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

APRIMORAMENTO DO MODELO DE ANÁLISE INTEGRADA BLUES E ESTUDO DE CASO PARA OS *SHARED SOCIOECONOMIC PATHWAYS*

Luiz Bernardo Carneiro da Silva Baptista

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: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2020

APRIMORAMENTO DO MODELO DE ANÁLISE INTEGRADA BLUES E ESTUDO DE CASO PARA OS *SHARED SOCIOECONOMIC PATHWAYS*

Luiz Bernardo Carneiro da Silva Baptista

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 PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientador: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Examinada por: Prof. Pedro Rua Rodriguez Rochedo
Prof. André Frossard Pereira de Lucena
Dr. Régis Rathmann

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2020

Baptista, Luiz Bernardo Carneiro da Silva

Aprimoramento do modelo de análise integrada BLUES e estudo de caso para os *Shared Socioeconomic Pathways*/Luiz Bernardo Carneiro da Silva Baptista. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XVI, 141 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 107 – 133.

1. Modelo de análise integrada. 2. Shared Socioeconomic Pathways. 3. Cenários. I. Rochedo, Pedro Rua Rodriguez. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

"*Don't panic.*"
- The Hitchhiker's Guide to the Galaxy, Douglas Adams

"*It's chaotic, but hey, it's home.*"
- Genie of the Lamp, Aladdin

"*There's a lesson here, and I'm not the one that's gonna figure it out.*"
- Rick, Rick and Morty

"*Do or do not. There is no try.*"
- Master Yoda, Star Wars

"*Don't be patient. Don't ever be. This is the way a new world begins.*"
- The Stone Sky, N. K. Jemisin

"*Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir,*
mais de le rendre possible."
– Antoine de Saint Exupéry

"*Anyone who believes that exponential growth can go on forever in a finite*
world is either a madman or an economist."
- Kenneth E. Boulding

"*Thoughts! All of it, different! I feel like my eyes are reopened every day!*
Everything is so much more than I could have imagined! I amount so little!
A tiny, insignificant spec in the wide, wide world!"
- Oden, One Piece, Eiichiro Oda

"*I think maybe we die every day. Maybe we're born new each dawn,*
a little changed, a little further on our own road. When enough days
stand between you and the person you were, you're strangers.
Maybe that's what growing up is. Maybe I have grown up."
- Prince of Thorns, Mark Lawrence

"*Now, let us drink.*
Let us drink, to this creature called man.
In every age, there will be good humans and bad humans.
Human life is too long to devote to reproduction, yet too short to devote to
learning, in the helix of time.
Perhaps that is why humans succumb to desire and seek release.
Despite the fact that life is complete with the sun, the land, and the poetry."
- *This Creature Called Man*, Masao Kikuchi

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer à todos que contribuíram de alguma forma para este trabalho, aos que me acalmaram em momentos de desespero, aos que me ajudaram a lembrar de prazos, aos que me distraíram quando necessário, aos que me auxiliaram com a parte burocrática da UFRJ, enfim, à todos que me permitiram chegar aqui. Espero que todos os que participaram dessa fase da minha vida sintam-se agradecidos de alguma forma.

Aos meus pais, pelo suporte psicológico e apoio incondicional. Amo vocês.

Ao meu pai, pelo companheirismo, amizade e incentivo sem igual. Muito obrigado por me incentivar buscar fazer o que amo e sempre me estimular a buscar o meu melhor. Amo você, paizão.

À minha mãe, que independente de qualquer coisa é a pessoa que sei que posso contar pra tudo. Obrigado pelas visitas que sempre trouxeram novos ânimos em períodos difíceis. Amo você.

À minha avó Romi "*in memoriam*", por todas as vezes que você se surpreendeu ao descobrir que eu que havia feito o almoço, essa lembrança sempre me traz conforto quando cozinho na sua casinha. Você faz muita falta, vó. Amo você.

A Rebecca, por toda a paciência do mundo, pelo companheirismo e por toda a sua ajuda nos momentos de desespero. Eu espero que você saiba o tamanho de toda a sua contribuição para essa dissertação, seja me ouvindo reclamar que não conseguia ir embora do Fundão às 8h da noite em pleno janeiro ou seja por estar presente e saber me distrair quando era necessário. Sem você nada disso seria possível, obrigado, mô. Amo você.

Aos meus irmãos, Bruna, Lucca, Mário e Samantha, obrigado por serem tão presentes na minha vida. Que a nossa cozinha nunca pare quieta e sempre tenhamos muita coisa para fazermos juntos. Amo vocês.

Ao meu orientador, Pedro Rochedo. Não sei como agradecer o tempo, a paciência e os ensinamentos adquiridos sob sua supervisão e amizade. Obrigado por não permitir

nunca que as nossas reuniões eternas de 6 horas se tornassem monótonas e complicadas, por entender o nível de complexidade do BLUES e por toda a sua acessibilidade. Pedro, muito obrigado por tudo, de coração.

Aos professores do PPE, preciso agradecer por todo o aprendizado adquirido. Em especial aos professores Alexandre Szklo, André Lucena, Joana Portugal, Pedro Rochedo e Roberto Schaeffer, obrigado por todas as discussões durante os nossos almoços e por todo aprendizado passado em sala de aula ou em reuniões de projetos, além de tornarem o laboratório Cenergia em um lugar tão bom de se habitar. Há, aqui, espaço para um agradecimento especial para o professor André Lucena e sua disciplina de Economia do Meio Ambiente: muito obrigado, André, um sonho seria ver todos os planejadores energéticos aprendendo tudo que você passa nesta disciplina.

Aos Cenergéticos: Amanda, Bruno, Camila, Camilla, Camilo, Clarissa, Eduardo, Eve, Fábio A., Fábio T., Fran, Gerd, Isabela, Letícia, Mariana, Marianne, Matheus, Paula, Pedro, Rafa, Rebecca, Rodrigo, Tainan, Taísa e Talita, obrigado por tornarem meus dias mais prazerosos. Vocês todos tiveram uma participação especial nessa dissertação, seja no break do cafézinho ou com palavras de apoio, obrigado, de verdade.

Ao Fábio Teixeira e ao Gerd, obrigado pelas distrações nos momentos de tensão. Vocês são dois grandes pesquisadores que sempre me fazem aprender mais, toda conversa nossa durante o cafézinho é um aprendizado, obrigado por tudo.

Aos meus queridos modeleiros do BLUES (Eve, Gerd, Mari, Pedro), do COFFEE (Gerd, Pedro) e do TEA (Bruno, Rafa), obrigado por todas as nossas trocas e toda a disponibilidade. Modelar é muito mais prazeroso quando se tem um time desses quando surge qualquer dúvida.

A Marcella Freitas e Tássia Nunes, obrigado por serem as grandes amigas que o PPE me deu. Estudar pra física não seria a mesma coisa sem você, Tatá. E Marcella, obrigado por ser tão paciente comigo em todos os momentos e ser essa grande amiga e parceira que você é. Espero que saibam o quão especial é ter vocês na minha vida e poder sempre aprender mais um pouquinho com vocês.

Ao meu *roomie*, Jóta, por muitas vezes me perturbar para jogarmos algo juntos e por saber melhor que eu quando eu precisava parar de trabalhar para me distrair.

Ao Biel, Gui, Ilana, Jacques, Jóta, Léo, Martha, Taynnã, Thales, Thaynara e Rapha: obrigado por serem amigos para todas as horas. Vocês são pessoas incríveis que fazem os meus dias mais tranquilos, é muito bom ter vocês sempre perto.

Ao Diego Malagueta, obrigado por me apresentar o PPE. Obrigado por ser esse grande amigo e eterno orientador.

Aos funcionários do PPE: Fernando, Irene, Josi, Paulo, Queila e Sandrinha, muito

obrigado por serem pessoas tão especiais e solícitas, sou muito grato por toda a ajuda de vocês e por saber que posso sempre contar com isso, às vezes passo na secretaria só para dizer “bom dia"a todos, porque vocês merecem. Não querendo ser puxa saco, mas devo um agradecimento especial para a Sandrinha, muito obrigado por ser essa pessoa tão querida por todos no Programa e por tratar todos como se fossemos seus filhos, o PPE não teria tanta graça sem você.

Aos membros da banca, André Lucena e Régis Rathmann, obrigado por aceitarem o convite dessa banca examinadora e por todas as contribuições.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES), em que devo agradecer pelo financiamento.

E à você, caro leitor, obrigado por usar alguns segundos do seu dia para ler sobre as pessoas que foram especiais para mim. Espero que este trabalho possa lhe ajudar em algo e te desejo uma ótima leitura.

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

APRIMORAMENTO DO MODELO DE ANÁLISE INTEGRADA BLUES E ESTUDO DE CASO PARA OS *SHARED SOCIOECONOMIC PATHWAYS*

Luiz Bernardo Carneiro da Silva Baptista

Fevereiro/2020

Orientador: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Programa: Planejamento Energético

A influência da atividade humana sobre as mudanças climáticas torna-se cada vez mais evidente. Isso faz com que ações de mitigação sejam cada vez mais necessárias para compensar os níveis de emissão. Dessa forma, modelos de análise integrada podem ser usados para estudar a aplicação de políticas climáticas e seus impactos sobre os sistemas. Para isso, faz-se necessário o uso de cenários, que são narrativas de trajetórias dos sistemas socioambientais e econômicos e descrevem premissas para as análises integradas nos modelos. Deste modo o objetivo deste presente trabalho é o aperfeiçoamento da representação do setor industrial e de transportes de um modelo de análise integrada, o BLUES, bem como introduzida a automatização na troca de informações entre este modelo e um modelo de equilíbrio geral, o TEA. Como estudo de caso, são implementados e avaliados os *Shared Socioeconomic Pathways* no BLUES. Com isso, é perceptível como as narrativas afetam as escolhas do modelo, como a maior eletrificação em dados cenários ou a preferência por tecnologias renováveis em outros. A entrada de novas tecnologias foi determinante em todos os cenários, porém de forma diferenciada. De forma geral, destacam-se as fontes renováveis, biocombustíveis avançados e opções de hibridização do setor de transporte. Ademais, esforços para conter o desmatamento são chave para atingir níveis baixos de emissões, embora não suficientes para atingir as metas de 2°C relativos à temperatura média da era pré-industrial, em 2100.

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

EVALUATION OF THE SHARED SOCIOECONOMIC PATHWAYS IN A BRAZILIAN INTEGRATED ASSESSMENT MODEL

Luiz Bernardo Carneiro da Silva Baptista

February/2020

Advisor: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Department: Energy Planning

The influence of human activity on climate change is becoming increasingly evident. This makes mitigation actions necessary to compensate for these emissions. Integrated Assessment Models can be used to study the application of climate policies and its impacts. Therefore, scenarios, which are narratives for trajectories of socio-environmental and economic systems, can be a useful mean to describe assumptions on integrated models analyzes. Then, the objective of this work is to improve the representation of the industrial and transportation sectors in a Brazilian integrated assessment model, known as BLUES, and the first steps for the information exchange automation between the BLUES model and a global general equilibrium model, know as TEA. As a case study, the Shared Socioeconomic Pathways are implemented and evaluated in the Brazilian integrated model. Hence, it is noticeable how the narratives affect the model's choices, such as a greater electrification in some scenarios or a preference for renewable technologies in others. The introduction of new technologies was decisive in all scenarios. In general, the renewable sources, advanced biofuels and hybridization options in the transport sector were the decisive highlights of the scenarios. Furthermore, efforts to curb deforestation are key to achieving low levels of emissions, although not sufficient to achieve the 2°C target relative to the average temperature of the pre-industrial era, in 2100.

Sumário

Lista de Figuras **xii**

Lista de Tabelas **xv**

1 Introdução **1**

1.1 Contextualização 1

1.2 Objetivos 3

1.3 Estrutura da dissertação 3

2 Modelos de análise integrada, cenários e tecnologias inovadoras **5**

2.1 Modelos de Análise Integrada 5

2.1.1 TEA 8

2.2 Construção de cenários em modelos integrados 9

2.2.1 Cenários globais 11

2.2.2 *Shared Socioeconomic Pathways* 13

2.3 Tecnologias inovadoras para um mundo de baixo carbono 19

2.3.1 Geração renovável de eletricidade 20

2.3.2 Captura e armazenamento de carbono 21

2.3.3 Veículos do setor de transportes 22

2.3.4 Bioenergéticos 24

3 Método Proposto **26**

3.1 MESSAGE 26

3.2 BLUES 28

3.2.1 Setor industrial 32

3.2.2 Setor de transportes 33

3.3 Modificações transversais no modelo BLUES 35

3.3.1 Demanda 36

3.3.2 Quota de participação de energéticos 38
3.4 Modificações no setor industrial 39
3.4.1 Modificações na demanda 39
3.4.2 Modificações tecnológicas 40
3.5 Modificações no setor de transportes 43
3.5.1 Modificações na demanda 43
3.5.2 Modificações tecnológicas 49
3.6 Estudo de caso dos SSPs 56
3.6.1 Indústria 62
3.6.2 Transporte 67

4 Resultados **74**
4.1 Resultados dos cenários 74
4.1.1 Energia primária 74
4.1.2 Geração elétrica 78
4.1.3 Biocombustíveis 81
4.1.4 Uso do solo 82
4.1.5 Emissões 85
4.1.6 Contribuição setorial para a mitigação de emissões 89
4.1.7 Setor industrial 90
4.1.8 Setor de transportes 92
4.2 Discussão dos resultados 99

5 Considerações finais **104**

Referências Bibliográficas **107**

A Premissas qualitativas dos SSPs **134**

B Consolidação das alterações no modelo **136**

C Resultados complementares **137**
C.1 Energia primária 137
C.2 Mitigação setorial 138
C.3 Consumo industrial 139
C.4 Esforço de mitigação 140

Lista de Figuras

2.1 Desafios à mitigação e à adaptação nos SSPs 15
2.2 Esquema de funcionamento do veículo elétrico a pilha a combustível a etanol 23

3.1 Detalhamento das regiões do BLUES e suas interligações 30
3.2 Exemplo de fluxo de transformação do setor industrial para o atendimento da demanda 34
3.3 Exemplo do fluxo de transformação do setor de transportes para o atendimento da demanda 35
3.4 Modelagem setorial e modelagem integrada. 36
3.5 Troca de informação entre os modelos TEA e BLUES 37
3.6 Conversão de demanda agregada para demanda normalizada 38
3.7 Limite superior e inferior da utilização de carvão e biomassa de uma indústria do BLUES 41
3.8 Comparativo entre o potencial máximo de medidas de mitigação em dado setor 42
3.9 Representação das cidades brasileiras por agregado populacional 46
3.10 População por região e agregado em faixa de idade 47
3.11 Cenários utilizados para o estudo de caso 56
3.12 Projeções macroeconômicas advindas modelo TEA sobre o PIB brasileiro, em bilhões de dólares 57
3.13 Demandas relativas ao ano base, por cenário 64
3.14 Demandas relativas ao ano base do setor de transporte de passageiro, por cenário 69
3.15 Demandas relativas ao ano base do setor de transporte de carga, por cenário 70

4.1 Energia primária (Mtoe) em 2030 e 2050 para os cenários analisados . . . 75

4.2 Intensidade energética (tep/kUS$) dos cenários analisados, linhas tracejadas representam os cenários de emissão 77
4.3 Geração elétrica (TWh) em 2030 e 2050 para os cenários analisados . . . 78
4.4 Produção de biocombustíveis (PJ) em 2030 e 2050 para os cenários analisados 81
4.5 Mudança de uso do solo (Mha) acumulada em 2050 83
4.6 Emissões acumuladas ($GtCO_2$) entre 2010 e 2050 85
4.7 Trajetória das emissões de CO_2 (Mt/ano) nos cenários analisados, com as linhas tracejadas representando os respectivos cenários de emissão 86
4.8 Emissões de CO_2 (Mt/ano) em 2030 e 2050 para os cenários analisados . 87
4.9 Intensidade de carbono (tCO_2/kUS$) dos cenários analisados 88
4.10 Mitigação setorial cumulativa ($MtCO_2eq$) nos anos de 2030 e 2050 . . . 89
4.11 Consumo industrial (EJ/ano) em 2030 e 2050 para os cenários analisados 91
4.12 Emissão industrial ($MtCO_2eq$) nos cenários base e restritivo do SSP4 e SSP5 93
4.13 Utilização de modal por cenário 94
4.14 Consumo do setor de transporte de passageiro (PJ/ano) em 2030 e 2050 para os cenários analisados 95
4.15 Consumo do setor de transporte de carga (EJ/ano) em 2030 e 2050 para os cenários analisados 96
4.16 Tonelada-quilômetro transportada (Mtku/ano) por combustível utilizado no veículo em 2030 e 2050 para os cenários analisados 98
4.17 Emissões acumuladas ($GtCO_2$) no cenário SSP5 101

A.1 Premissas demográficas e do desenvolvimento humano 134
A.2 Premissas econômicas, de estilo de vida e políticas públicas e instituições 135
A.3 Premissas tecnológicas e sobre o meio ambiente e recursos naturais 135

C.1 Energia primária (Mtoe) por cenário em 2030 137
C.2 Energia primária (Mtoe) por cenário em 2050 138
C.3 Mitigação setorial cumulativa ($MtCO_2eq$) nos anos de 2030 e 2050, sem mudanças de uso do solo 138
C.4 Consumo industrial (EJ/ano) em 2050 para os cenários analisados 139
C.5 Emissões acumuladas ($GtCO_2$) no cenário SSP1 140
C.6 Emissões acumuladas ($GtCO_2$) no cenário SSP2 140
C.7 Emissões acumuladas ($GtCO_2$) no cenário SSP3 141

C.8 Emissões acumuladas ($GtCO_2$) no cenário SSP4 141

Lista de Tabelas

3.1 Demandas do setor industrial no BLUES 33
3.2 Setor industrial agregado do TEA e setor correspondente do BLUES . . 40
3.3 Distâncias anuais percorridas pelas pessoas por modo de transporte e porte do município em 2016, por bilhões de km/ano 44
3.4 População brasileira por agregado de municípios, segundo tipologia utilizada pela ANTP 45
3.5 População brasileira por agregado de municípios 45
3.6 População brasileira por agregado de municípios separado em regiões, em milhões de habitantes 46
3.7 Percentual do total de passageiros transportados por sistemas metroferroviários em 2013 por Grande Região 48
3.8 Percentual das distâncias anuais percorridas pelas pessoas por modo de transporte e porte do município 48
3.9 Premissas do veículo leve 50
3.10 Premissas da massa e potência necessárias para os caminhões 50
3.11 Premissas gerais dos caminhões 50
3.12 Premissas do ônibus 51
3.13 Valor extensivo das estruturas 51
3.14 Valor extensivo dos componentes 52
3.15 Tabela de custo final para veículos terrestres, em US$ 52
3.16 Consumo específico dos veículos 54
3.17 Parâmetros simulados por cenário proposto 59
3.18 Parâmetros do setor de industrial por cenário 63
3.19 Valores quantitativos para mudanças de perfil na indústria 65
3.20 Valores quantitativos para a possibilidade de atingir o limite superior de utilização de MTDs, em anos 66
3.21 Valores quantitativos para a utilização de CCS pela indústria, em anos . 66

3.22 Parâmetros do setor de transportes por cenário 67
3.23 Valores quantitativos para a alteração de perfil de consumo pelo setor de transportes 71
3.24 Ano inicial de entrada por tecnologia por tipologia de cidade 72
3.25 Valores quantitativos para a alteração de perfil de consumo pelo setor de transportes, no ano de 2050 73
3.26 Valores quantitativos para a utilização de CCS na produção de hidrogênio, em anos 73

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

As mudanças climáticas globais são causadas tanto por um efeito natural, como a emissão de aerossóis por erupções vulcânicas e queimadas naturais, quanto por efeitos humanos, como queimadas florestais, modificações de uso do solo, produção de energia a partir de fontes fósseis, processos industriais, despejo não controlado de resíduos, modificações no albedo do solo, emissão de aerossóis e particulados por diferentes meios, entre outros. Para compreender melhor os possíveis impactos das mudanças climáticas foi criado o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), que tem como objetivo fornecer aos governos uma visão clara do estado atual do conhecimento sobre a ciência das mudanças climáticas, seus possíveis impactos e opções de adaptação e mitigação. O IPCC não tem como objetivo produzir nenhuma pesquisa científica propriamente original, mas sim tem como propósito revisar, sintetizar e divulgar o conhecimento científico, a partir das informações mais recentes publicadas na literatura técnico-científica [1, 2].

A influência da atividade humana sobre as mudanças climáticas torna-se cada vez mais evidente, como constatado em diferentes estudos do IPCC que refletem o consenso da literatura científica [1, 3]. As mudanças climáticas têm impacto direto sobre a vida humana e sobre os ecossistemas, como o aumento das ocorrências de períodos de seca e seus prolongamentos, possibilitando incêndios florestais como os ocorridos na Austrália [4], mais ocorrência de enchentes, aumento no nível dos oceanos e sua acidificação, entre outros diversos impactos [5–10].

As mudanças climáticas englobam diversas áreas das ciências, com as ciências naturais, sociais e políticas e avanços científicos sobre o seu entendimento demandam estudos de escalas sociais que implicam na criação de políticas climáticas eficientes. Para isto,

estudar maneiras de mitigar os efeitos das mudanças climáticas faz-se necessário, sendo o uso da modelagem integrada uma das possibilidades existentes, auxiliando no entendimento das aplicações de diferentes políticas [11].

Modelos de análise integrada (IAMs) podem ser definidos como uma abordagem que integra os conhecimentos e aspectos de dois ou mais setores em uma única estrutura, podendo seguir uma estrutura simplificada, como modelos teóricos, até estruturas complexas, que demandam alto poder computacional [11, 12].

De maneira geral, estes modelos podem ser globais, regionais ou setoriais. Não há uma definição clara sobre quais aspectos tais modelos podem se diferenciar, sendo diferentes tipologias utilizadas por diferentes autores [13–17]. Uma definição em comum encontrada em diferentes estudos se dá sobre a estrutura dos modelos, sendo que estas podem se dar de forma *bottom-up* e *top-down*.

Tais estruturas são abordadas na Seção 2.1 e são representadas, em sua maioria, por modelos de equilíbrio geral, no caso do *top-down*, e em modelos setoriais, no caso do *bottom-up*. Há, porém, a possibilidade de utilização destes modelos de forma associada, garantindo uma maior consistência global nos seus resultados [16]. É a partir desta maior consistência que se baseia parte dos objetivos deste trabalho.

Para a utilização destes modelos são necessárias narrativas sobre a evolução de sistemas socioambientais e econômicos, como uso do solo, sistemas energéticos, emissões de gases de efeito estufa, entre outros. Tais narrativas podem ser transcritas como cenários de longo prazo, que servem para auxiliar no processo de análise sobre mitigação, adaptação ou impactos das mudanças climáticas há mais de 20 anos, e podem ser citados cenários os cenários do IPCC (SA90, IS92 e SRES), os RCP[1] e os SSP[2] [18–21]. A utilização de cenários se mostra como uma estratégia essencial para o uso de IAMs.

Os cenários são um conjunto de narrativas futuras, que não procuram estimar com precisão o futuro, mas entender como um conjunto de premissas consistentes pode levar a uma condição de futuro possível. Deste modo, são usados através da definição de um número limitado de premissas, permitem uma análise avaliativa da dependência e sensibilidade de futuros possíveis sobre as suposições iniciais [16, 20].

Deste modo, este presente trabalho faz uso da implementação de determinados cenários, os *Shared Socioeconomic Pathways*, para analisar as possíveis implicações destas narrativas para o Brasil em 2050 como estudo de caso para analisar o aprimoramento do modelo de análise integrada BLUES[3], que é apresentado na Seção 3.2.

[1] *Representative Concentration Pathways*
[2] *Shared Socioeconomic Pathways*
[3] *Brazil Land Use and Energy Systems*

1.2 Objetivos

Este estudo visa a implementação de melhorias no setor industrial e de transportes do modelo de análise integrada BLUES e melhorias gerais no mesmo. Como estudo de caso há a integração e simulação dos cenários SSPs neste modelo, explorando as nuances de cada cenário e como tais premissas podem afetar narrativas de possíveis futuros para o Brasil a partir de uma análise sobre o setor energético, de uso do solo e setores econômicos.

Para a atualização do setor industrial é alterada a forma como ocorrem choques nas demandas industriais por diferentes cenários, bem como é facilitada a implementação destes choques a partir de uma automatização na troca de informações entre o modelo macroeconômico TEA[4] e o BLUES. São também suavizadas as curvas de entrada de diferentes tecnologias, que são criadas a partir de modelos satélite setoriais e são revistos os custos e as premissas de algumas tecnologias nestes setores.

Para o setor de transporte de passageiros, faz-se uso de uma metodologia encontrada na literatura para desagregar a demanda deste setor por diferentes tipologias de cidade, possibilitando a utilização de análises com maior desagregação no modelo.

Para o setor de transporte de passageiro e carga rodoviário, são adicionadas novas tecnologias como os veículos elétricos a pilha a combustível a hidrogênio e a pilha a combustível a etanol, bem como são revistos os custos dos veículos elétricos para tornálos mais próximos das recentes reduções de custos e é adicionado ao modelo o custo associado à infraestrutura da distribuição de hidrogênio.

Para a implementação destes cenários, são buscados e apresentados dados da literatura para justificar as premissas escolhidas e como estas estão representadas no modelo, como premissas sobre energia, uso do solo, poluição atmosférica, entre outras. Esta implementação se mostra como de significativa relevância para a comunidade acadêmica, devido a lacuna de estudos utilizando os SSPs em sua totalidade.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho é comporto por este capítulo introdutório, onde são apresentadas as suas motivações e seus objetivos.

No Capítulo 2 são apresentados alguns conceitos de modelos de análise integrada, cenários e algumas tecnologias inovadoras que são introduzidas no modelo. São apresentados alguns modelos utilizados pela comunidade científica voltada para pesquisas na área

[4] *Total Economy Assessment*, apresentado na Subseção 2.1.1.

de mudanças climáticas (Seção 2.1) e uma breve apresentação do modelo de equilíbrio geral TEA (Subseção 2.1.1). É exposta a utilização de cenários por modelos de análise integrada (Seção 2.2), bem como um breve histórico destes cenários (Subseção 2.2.1) e apresentados os *Shared Socioeconomic Pathways* (Subseção 2.2.2). Destacam-se algumas tecnologias inovadoras para um mundo de baixo carbono que são implementadas neste trabalho (Seção 2.3), com foco na geração renovável de eletricidade (Subseção 2.3.1), na captura e armazenamento de carbono associada ou desassociada do seu uso com a biomassa (Subseção 2.3.2), algumas tecnologias inovadoras do setor automobilístico com elevado potencial de uso pelo mercado brasileiro (Subseção 2.3.3) e algumas tecnologias do setor bioenergético (Subseção 2.3.4).

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta por este trabalho, se iniciando com a apresentação da plataforma no qual o modelo em que este trabalho é realizado está inserido (Seção 3.1) e a apresentação deste modelo, o BLUES (Seção 3.2), com um breve histórico do modelo e de trabalhos realizados a partir dele, há também um foco nos setores alterados neste trabalho: o setor industrial (Subseção 3.2.1) e o setor de transportes (Subseção 3.2.2). Na Seção 3.3 são apresentadas algumas alterações realizadas no modelo de maneira geral e na Seção 3.4 e na Seção 3.5 são expostas as modificações nos setores industrial e de transportes, respectivamente, complementadas com a consolidação destas alterações (Apêndice B). São descritas as premissas dos cenários (Seção 3.6), com foco nas premissas do setor industrial (Subseção 3.6.1) e no setor de transportes (Subseção 3.6.2).

O Capítulo 4 centraliza os resultados decorrentes dos cenários apresentados como estudo de caso neste trabalho e a discussão sobre os mesmos. São apresentados resultados (Seção 4.1), por cenário, como energia primária (Subseção 4.1.1), geração de energia elétrica (Subseção 4.1.2), produção de biocombustíveis (Subseção 4.1.3), alterações no uso do solo (Subseção 4.1.4), emissões acumuladas (Subseção 4.1.5), mitigação cumulativa (Subseção 4.1.6) e resultados setoriais, com foco no setor industrial (Subseção 4.1.7) e de transportes (Subseção 4.1.8), finalizando com uma discussão sobre o estudo de caso e indicando limitações que influenciam os resultados (Seção 4.2).

Por fim, no Capítulo 5 são retomadas as principais conclusões retiradas dos capítulos anteriores, indicando as possíveis limitações deste estudo e indicações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Modelos de análise integrada, cenários e tecnologias inovadoras

Neste capítulo são apresentados e elucidados modelos existentes de modelagem integrada, alguns cenários utilizados nestes modelos, os *Shared Socioeconomic Pathways* que são utilizados como cenários de análise neste trabalho e aspectos de inovação tecnológica à luz do setor energético, como no setor de transportes, nas energias renováveis e no setor de bioenergéticos, devido à sua importância na atualização do modelo, visando cenários de longo prazo.

2.1 Modelos de Análise Integrada

Os modelos de análise integrada (*Integrated Assessment Models* (IAM) se tornaram uma ferramenta de grande importância para estudar diferentes estratégias para lidar com as mudanças climáticas, como pela avaliação de riscos e impactos. Sua origem data da década de 1970 dos modelos criados pelo Clube de Roma, com uma abordagem holística para analisar questões como esgotamento de recursos, crescimento populacional e poluição ambiental [22]. São utilizados para descrever as complexas relações entre os fatores sociais, econômicos e ambientais a partir de cenários de longo prazo. Os IAMs podem ser usados para determinar os custos e os benefícios de políticas climáticas e ambientais, como a redução de emissão de gases de efeito estufa, identificando qual a trajetória menos custosa para alcançar determinados níveis de emissão, detectando quais são as melhores medidas de mitigação a serem utilizadas ou descrevendo os impactos econômicos de tais políticas. Por isso, funcionam como instrumentos importantes para o entendimento dos impactos mundiais causados pela adoção de novas políticas [23–25].

Os modelos integrados são capazes de relacionar diferentes atividades, como o fornecimento de água, energia e alimentos e sua maior vantagem é manter a consistência por todos os setores econômicos [26]. Isto é, há competição pelo uso de recurso por diferentes setores, como no uso do solo, com a penetração de culturas energéticas e alimentícias competindo entre si pela área existente, ou como no uso de derivados de petróleo, com energéticos podendo ser utilizados pelos setores industrial, residencial ou de transportes. IAMs conseguem, deste modo, auxiliar nos estudos e análises sobre diferentes políticas e como estas podem afetar a economia de maneira integral.

Estes modelos podem ser divididos em modelos de circulação, de uso do solo, econômicos e energéticos [2, 25]. Os modelos de circulação foram projetados inicialmente para abordar problemas ambientais, representando a terra, os ecossistemas, a atmosfera, os oceanos e o gelo. São criados para estimar os efeitos causados por alterações como o albedo terrestre, a constante solar, concentração de gases de efeito estufa ou o regime dos ventos e realizam tal estimativa através da simulação de equações de balanço de energia, massa e momento, considerando o planeta como um todo sendo seu sistema de análise [27–29], podem também ser utilizados para descrever o que ocorreu em períodos passados [30, 31]. O IPCC faz uso dos resultados de diversos destes modelos para descrever os possíveis impactos das mudanças climáticas [32–34]. É de extrema importância citar modelos climáticos desenvolvidos no Brasil, como o BESM[1] [35–37].

Os modelos de uso do solo representam as possíveis alocações do uso da terra e suas modificações no tempo. Podem ser utilizados para calcular o estoque de carbono em áreas de florestas e de culturas agrícolas, bem como as emissões relacionadas às alterações realizadas neste uso, como podem também considerar o consumo de água necessário para o plantio e pecuária [38]. Estes modelos podem ser de equilíbrio parcial, como o IMPACT[2] do *International Food Policy Research Institute* (IFPRI) [39] e o GLOBIOM[3] do IIASA[4] [40], ou de minimização de custos de produção, como o MAgPIE[5] do *Potsdam Institute for Climate Impact Research* (PIK) [41]. Destes modelos de uso do solo, devem ser citados os modelos desenvolvidos no Brasil, como o OTIMIZAGRO [42, 43].

Os modelos econômicos têm, geralmente, a economia como módulo mais detalhado e a utilizam como base para tomada de decisão. São modelos que assumem o mercado competitivo em pleno funcionamento, isto é, transações não mercantis, assimetrias de informação e decisões que influenciam o poder de mercado não são efetivamente repre-

[1] Brazilian Earth System Model
[2] *International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade*
[3] *Global Biosphere Management Model*
[4] *International Institute for Applied Systems Analysis*
[5] *Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment*

sentadas [2]. Podem ser mais simples, por não modelarem processos e relações mais detalhadas entre economia, energia e o clima, como o DICE[6] de Nordhaus [11] ou o PAGE[7] de Hope [44] e os mais complexos, que analisam com mais detalhes tendências sociais e econômicas relacionadas com emissões de gases de efeito estufa e tecnologias energéticas, como o AIM-CGE[8] do *National Institute for Environmental Studies* [45] e o TEA[9] de Cunha [2]. Sobre estes modelos, deve ser citada a tradição de modelagem econômica no Brasil, como nos modelos EFES e SPARTA [46, 47].

Os modelos energéticos[10] combinam oferta e demanda de energia baseadas na representação detalhada de tecnologias, combustíveis e suas transformações. Podem ter representação de uso do solo, uso de água, ser espacialmente discretizados, acúmulo ou somente emissão de gases de efeito estufa, reservas de recursos não renováveis, analisar o nexo água-energia-alimento, entre outros. Alguns destes modelos que podem ser citados são: o módulo *The IMage Energy Regional model* (TIMER) [48, 49] do modelo global *Integrated Model to Assess the Global Environment* (IMAGE) [50] e o MESSAGEix, versão atual do modelo *Model for Energy Supply Systems And their General Environmental impact* (MESSAGE) do IIASA [51, 52].

Após sua ampla utilização por diversos grupos de pesquisa pelo mundo, os IAMs começaram a ser divididos em dois grupos, os modelos mundiais e os regionais. Os modelos mundiais buscam retratar as relações entre a dinâmica de políticas climáticas de cada região sobre o clima global, porém geralmente se restringem a criação de tecnologias representativas sem muita individualização de dados por país/região, como visto em modelos como o MESSAGE, o IMAGE, o TEA e o COFFEE[11]. Modelos regionais tendem a ter um maior detalhamento de tecnologias por país/região, visto que podem ser utilizados para análises mais particulares [25, 53]. São necessários para complementar estudos de modelos globais, pois alguns destes não representam de maneira concisa regiões e países em desenvolvimento. Dado o expressivo aumento de emissão de gases de efeito estufa por estes países, a utilização de modelos nacionais e regionais se torna cada vez mais importante para analisar possíveis ações de mitigação [54]. Um exemplo de modelo nacional é o BLUES [55], modelo no qual este trabalho está baseado.

Há ainda a diferenciação por tomada de decisão, que se relaciona ao funcionamento matemático do modelo a partir de um conjunto de restrições, diferenciando modelos

[6] *Dynamic Integrated model of Climate and the Economy.*
[7] *Policy Analysis of the Greenhouse Effect*
[8] *Asian-Pacific Integrated Model - Computable General Equilibrium module*
[9] *Total-Economy Assessment*
[10] São também conhecidos como modelos de processo.
[11] *COmputable Framework For Energy and the Environment model*

de otimização e simulação. Uma importante disparidade entre tais modelos, se dá que um modelo de simulação apenas pretende vislumbrar o desempenho de um determinado sistema, a partir de suas premissas e o modelo de otimização busca a configuração ideal do sistema como um todo. Em suma, modelos de otimização buscam uma solução ideal, enquanto modelos de simulação servem para respostas mais rápidas de diferentes cenários [56].

Uma outra distinção pode ser feita ao se considerar a estrutura dos modelos, com a abordagem *bottom-up* e *top-down*. Há subgrupos nestas abordagens, dificultando a diferenciação entre as mesmas. Deste modo, é mais fácil interpretá-las de maneira contínua e com suas formas mais representativas sendo o extremo de cada lado. Modelos com estrutura *bottom-up* geralmente tendem a focar no sistema energético e apresentam diversas tecnologias únicas para tentar capturar dinâmicas como as de substituição de vetores energéticos ou as de eficiência energética. Já modelos do tipo *top-down* enfatizam a relação entre economia e sistemas energéticos, sendo estes sistemas representados, na maioria dos casos, de maneira agregada e fazem uso de funções de produção para capturar fatores de capital, trabalho e energia, com suas possíveis substituições representadas através da elasticidade [49].

Por fim, os modelos podem se diferenciar em na otimização recursivo dinâmica[12] e otimização intertemporal[13]. O recursivo dinâmico tem uma visão do futuro limitada, ou seja, realiza as otimizações período a período, enquanto a otimização intertemporal tem uma visão de todo o horizonte de modelagem, com informação perfeita, e assim realiza a otimização de toda a trajetória. Pela diferença de algoritmo de otimização, pode ser citado o AIM-CGE como modelo recursivo dinâmico e o COFFEE como otimização intertemporal [26, 45].

Após essa breve apresentação sobre modelos de análise integrada, pode ser apresentada a estrutura do modelo TEA, pois este modelo é utilizado de maneira indireta por este trabalho.

2.1.1 TEA

O modelo TEA é um modelo multirregional e multissetorial de equilíbrio geral computável que foi apresentado na Tese de Doutorado de Cunha [2] e está descrito no *working paper* de Cunha *et al.* [57]. Sua estrutura é baseada em outros modelos como o MIT EPPA e o COFFEE, em que considera a evolução dos fatores primários de produção em

[12]São também conhecidos como modelos de *perfect foresight*.
[13]São também conhecidos como modelos de *inter-temportal optimization*.

18 regiões do mundo e 16 setores econômicos. Este modelo foi criado para ser utilizado em análises econômicas de cenários de emissão, utilizando diferentes políticas climáticas [57].

É um modelo de equilíbrio geral formulado como um problema de complementaridade mista e baseado na linguagem GAMS. O TEA tem como fundamento a lógica por trás da análise insumo-produto e contabilidade social e conta com três condições para haver uma consistência da base de dados, com o lucro econômico do produtor sendo igual a zero, equilíbrio de preço de commodities e competição perfeita para se alcançar o equilíbrio geral [2, 57].

O ano base do modelo é o ano de 2011 e o horizonte de análise é o ano de 2100, com um intervalo de 5 anos que pode ser alterado para anual. A divisão regional conta com os países do BRICS e alguns dos países desenvolvidos de forma individualizada, sendo as outras regiões agregadas da mesma forma que o modelo COFFEE [26], de maneira a possibilitar uma maior integração entre estes modelos [57].

Há a separação em 5 setores macroeconômicos no modelo, sendo estes setores subdivididos em 57 bens de consumo e setores existentes na base de dados do GTAP[14]. A agregação destes setores também foi realizada de maneira a facilitar a integração entre o modelo TEA e o modelo COFFEE, podendo também ser aproveitada pelo modelo BLUES. São considerados os fatores de produção de capital e trabalho, com mobilidade intra-regional e os fatores de terra e recursos naturais, considerados fixos [57].

A partir desta curta exposição sobre modelagem integrada, na próxima seção é apresentado o conceito de cenário, utilizado para auxiliar tais modelos nas suas análises e permitir a comparação entre os diferentes modelos existentes.

2.2 Construção de cenários em modelos integrados

Não é possível saber ao certo como se dará o crescimento econômico ou populacional, como tecnologias irão se desenvolver ou como ocorrerão possíveis mudanças comportamentais. A utilização de cenários como maneira de descrever narrativas para guiar tais crescimentos e mudanças é conhecida e utilizada por analistas como forma de auxiliar no planejamento, já que as informações e projeções tornam-se mais incertas quanto maior for o horizonte de tempo a ser analisado.

Cenários podem ser considerados uma resposta plausível à perguntas do tipo "*what if*", não devem ser confundidos como tentativas de prever o futuro, mas sim narrativas

[14]Global Trade Analysis Project

de possíveis futuros plausíveis.

Os cenários foram inicialmente usados em jogos e pelos militares, nos anos 1960, com o intuito de criar narrativas de futuros possíveis, tendo a Shell como uma das empresas pioneiras na introdução de cenários como forma de planejamento estratégico no fim da década de 1960. Hoje é considerada como o clássico exemplo da utilização de cenários [58–61].

A utilização de cenários é de suma importância para o contexto das mudanças climáticas, pois é um processo que tende a escalar com o passar do tempo e suas consequências não são necessariamente sentidas no curto prazo. São um problema que envolvem decisões de hoje que serão repercutidas por anos e modelos de análise integrada fazem uso de cenários para estudar certas narrativas de possíveis mundos futuros [26]. Sob esse quesito, podem ser citados cenários históricos, como os de Burrows *et al.* [62], Kaplan [63], Raskin *et al.* [64] e os primeiros cenários do IPCC [65, 66].

Uma importância dos cenários é por eles facilitarem a comparação entre modelos de análise integrada ao se padronizar a utilização de cenários, como os *Representative Concentration Pathways* (RCP) [20, 67], os *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) [21], ou métricas de limites de emissão de carbono, como visto em Fujimori *et al.* [68].

Cenários são utilizados para auxiliar na criação de trajetórias de modelos integrados, com o intuito de melhorar o entendimento das interações entre os diferentes sistemas terrestres. Isto é realizado a partir da descrição de futuros plausíveis para diferentes fatores, como socioeconômicos, tecnológicos e ambientais e também emissões de gases de efeito estufa e aerossóis. Segundo Moss *et al.* [20], tais cenários podem se diferenciar em cenários climáticos, ambientais, de vulnerabilidade e de emissão, sendo este último um dos primeiros tipos de cenários a serem utilizados, tentando responder a questão de como se comportaria o sistema climático com diferentes aumentos de concentração de dióxido de carbono.

Cenários de emissão compreendem diferentes descrições de potenciais descargas de gases de efeito estufa e aerossóis na atmosfera terrestre, que afetam o balanço de radiação da Terra. Tais cenários são produzidos com modelos de análise integrada e se baseiam em hipóteses como crescimento econômico e populacional, desenvolvimento tecnológico, uso do solo, entre outros fatores. Além da sua utilização em modelos climáticos para analisar as possíveis mudanças do clima, são utilizados para explorar alternativas energéticas e tecnológicas, possibilitando, a partir de uma comparação com cenários de base, a criação de políticas que possibilitem alcançar tais cenários de emissão. Estes cenários não captam flutuações de curto prazo, como mudanças nos ciclos de negócios e variações do preço do petróleo, mas focam em alterações de longo prazo para se aproximar do intervalo de

tempo das mudanças climáticas [20, 69, 70].

Cenários climáticos são representações plausíveis de condições climáticas futuras, como temperatura, umidade e precipitação. Podem ser produzidos usando uma metodologia incremental, em que as variáveis climáticas são alteradas a partir de um valor conhecido; usando uma metodologia de analogia espacial e temporal, que faz uso de dados históricos registrados para extrapolar condições futuras; e outras técnicas, como extrapolação a partir do conhecimento técnico. A partir dos cenários climáticos podem ser produzidos os cenários ambientais, que têm um maior detalhamento nas condições físicas do ambiente. Tais cenários têm como foco as modificações nas condições ambientais que podem ocorrer independente das alterações climáticas, como disponibilidade e qualidade de recursos hídricos, alterações nas características do solo e na qualidade do ar, entre outros [20, 71, 72].

Os cenários de vulnerabilidade fazem uso de efeitos sobre fatores demográficos, econômicos, culturais, políticos e institucionais para avaliar os potenciais riscos da vida terrestre a partir das mudanças climáticas, bem como analisam a vulnerabilidade de diferentes tipos de crescimento econômico e sua capacidade de adaptação a potenciais impactos [20, 73, 74].

Introduzidos os conceitos básicos de cenários e sua importância para a modelagem integrada, nesta seção é apresentado um breve histórico dos cenários utilizados pelos grupos de modelagem integrada e explicadas as diferentes linhas narrativas dos SSPs para, posteriormente, serem apresentadas as considerações utilizadas destas linhas narrativas no modelo utilizado para este trabalho.

2.2.1 Cenários globais

Anteriormente aos cenários dos SSPs, o IPCC fez uso de cenários de emissão e cenários climáticos como um componente principal do seu trabalho de analisar trabalhos relacionados ao tema das mudanças climáticas. Estes cenários merecem uma breve apresentação devido a sua importância nas pesquisas relacionadas às mudanças climáticas e são eles os SA90, IS92, SRES e RCP [20, 66].

O primeiro grupo de cenários, os SA90, foram requisitados pelo IPCC aos grupos de pesquisa dos Estados Unidos e da Holanda. Foram utilizados quatro cenários, o cenário A que foi considerado o *Business as Usual*, ou seja, linha de base, e os cenários B, C e D, que obedeciam a níveis de emissões correspondentes a diferentes aumentos de temperatura no decorrer dos anos [75].

Estes quatro cenários eram representados por diferentes níveis de emissões de dióxido

de carbono, óxido nitroso, metano e clorofluorocarbonetos. A partir das emissões destes gases e dos seus respectivos potenciais de aquecimento (GWP[15]), foram então utilizados modelos de circulação para calcular os respectivos níveis de aquecimento destes cenários para o final do século XXI [66, 75].

Pouco tempo após a conclusão do cenário SA90, alguns eventos ocorreram e novas informações foram disponibilizadas, como a revisão das projeções de população realizadas pelo Banco Mundial e pelas Nações Unidas, com a publicação dos cenários do subgrupo de energia e indústrias do IPCC, mudanças políticas e econômicas na antiga União Soviética e em parte da Europa e algumas revisões relacionadas a mudança de uso do solo. Tais fatores ocasionaram na revisão dos cenários SA90, chegando nos conjunto de cenários conhecidos como IS92 [65, 66, 76].

Os IS92 compreendem seis cenários, do IS92a ao IS92f, que têm como foco as emissões de CO_2, CH_4, N_2O, halocarbonetos, óxidos de enxofre, monóxido de carbono e compostos orgânicos voláteis, relativas ao seu uso energético e de atividades de uso do solo. Tais cenários consideram diferentes projeções de crescimento populacional e econômico, consumo energético, de uso do solo, entre outros [76]. Além disso, ainda se diferenciam em diferentes áreas, como por considerar o comprometimento em redução de emissão de gás carbônico dos países da OCDE (IS92b), redução no consumo de combustíveis fósseis e maior penetração de energia nuclear (IS92c) e até um maior controle na emissão de poluentes locais, utilizando a incorporação da externalidade ambiental no custo dos combustíveis fósseis (IS92d) [65, 66].

Em 1995 os cenários IS92 foram avaliados e nesta avaliação foram recomendadas alterações significativas nas principais diretrizes das emissões de gases de efeito estufa e na metodologia utilizada. Algumas destas revisões indicavam melhorias na intensidade de carbono de energéticos, diferenças entre países desenvolvidos e em desenvolvimento e emissões de enxofre, que acarretaram, em uma plenária do IPCC em 1996, na escolha da criação de um novo conjunto de cenários, os SRES[16] [77].

Os SRES compreendem 40 cenários que foram desenvolvidos por 6 times de modelagem. Estes 40 cenários foram divididos em quatro diferentes narrativas (A1, A2, B1 e B2) que são conhecidas como as famílias de cenários e estas narrativas foram uma primeira tentativa para facilitar a interpretação dos cenários de emissão, além da utilização de mais grupos de modelagem. A família A1 representa os cenários que consideram um rápido desenvolvimento econômico e baixo crescimento populacional, diferente da família B2 com seus cenários que consideram um crescimento econômico e populacional interme-

[15] *Global Warming Potentials*
[16] *Special Report on Emissions Scenarios*

diário. Dentro destas famílias, existem diferentes grupos de cenários, em que cada grupo representa alguma ênfase para a narrativa, como uma ênfase em combustíveis fósseis ou não fósseis [20, 77].

Até então, tais cenários eram desenvolvidos e aplicados de uma forma sequencialmente linear, de forma que a partir de cenários socioeconômicos eram gerados cenários de emissão, que serviam como base para modelos de circulação chegarem a resultados de impactos, adaptação e vulnerabilidade. Isto ocasionava em algumas inconsistências e atrasos, pois um grupo de cenários dependia do desenvolvimento do grupo anterior, chegando a se tornar um processo que levava alguns anos para se dar como completo. A partir disso foi então desenvolvida a metodologia de criação de cenários em paralelo, com os cenários climáticos sendo criados paralelamente aos seus complementares socioeconômicos e, com isso, foram criados os RCPs[17] e os SSPs [20].

Os RCPs foram criados a partir da seleção de resultados de diferentes concentrações de emissões de gases de efeito estufa de quatro modelos distintos. Era necessário com que fossem compatíveis com toda a gama de cenários de mitigação e emissão disponíveis na literatura científica, que fossem uma quantidade gerenciável de cenários e que seu número fosse par[18], que fossem distintos os cenários de forçamento radiativo e que fossem disponíveis todos os resultados relevantes sobre uso do solo e sistemas energéticos [20, 67].

Deste modo, foram selecionados quatro dos 324 cenários existentes no banco de dados do IAMC[19] e o valor do forçamento radiativo estimado para o ano de 2100 atribuído ao nome de cada RCP, sendo eles: 2,6; 4,5; 6,0 e 8,5 W/m^2 [67, 78].

De maneira a complementar as trajetórias de emissão consideradas nos RCPs, foram criados os cenários dos SSPs, apresentados na próxima seção.

2.2.2 *Shared Socioeconomic Pathways*

Os SSPs podem ser definidos como cinco narrativas que descrevem alternativas plausíveis nas mudanças demográficas, econômicas, tecnológicas, sociais, governamentais e ambientais ao longo da escala deste século, com o objetivo de facilitar a análise entre modelos de diferentes grupos de pesquisa [18, 21] a partir da padronização das premissas utilizadas, que ocorre por tornarem comuns grandes variações possíveis das variáveis macroeconômicas em narrativas consistentes. Possibilitam, também, seu uso pelo grupo

[17] *Representative Concentration Pathways*

[18] O número par de cenários serve para que não ocorra uma preferência pelo cenário central, que poderia se aproximar do caso mais provável.

[19] *Integrated Assessment Modelling Consortium*

científico de Adaptação e Impacto (Grupo II[20]) e Mitigação (Grupo III[21]) [79, 80].

Estes cenários consistem basicamente de dois elementos principais: uma linha narrativa e um conjunto de medidas quantificadas de desenvolvimento, em que não é assumida nenhuma mudança climática nem os possíveis impactos causados pela mesma. A intenção de não incorporar estes efeitos nas narrativas de base dos SSPs foi para que tais mudanças possam ser facilmente utilizadas por pesquisadores e possibilitando a comparação entre as narrativas com e sem mudanças climáticas, porém aproveitando as mesmas condições socioeconômicas e ambientais de referência [21]. Estes cenários foram criados como forma de padronizar as premissas a serem utilizados em modelos, a partir das trajetórias de narrativas geradas.

Para levar em conta os impactos das mudanças climáticas os cenários dos SSPs podem ser utilizados juntamente com os RCPs[22], formando uma matriz de cenários, como visto em van Vuuren *et al.* [81]. Os RCPs foram selecionados a partir da variação de diferentes forçamentos radioativos, ou seja, com cenários sobre diferentes níveis de emissão e concentração de gases de efeito estufa.

Os cenários dos SSPs decorrem da combinação do que foram considerados os três principais fatores de incerteza sobre os resultados de cenários de longo prazo, são eles os fatores clima, socioeconômico e políticas climáticas adotadas. A Figura 2.1 ilustra, em uma escala fictícia, os desafios relacionados à implementação de medidas de adaptação (eixo horizontal) e de mitigação (eixo vertical) nas cinco linhas narrativas dos SSPs, quais sejam: SSP1 (mundo sustentável); SSP 2 (mundo que segue a dinâmica atual); SSP 3 (mundo fragmentado); SSP 4 (mundo desigual); e SSP 5 (mundo com desenvolvimento convencional). As premissas qualitativas destes cenários se encontram no Apêndice A e são retiradas de O'Neill [21].

O SSP1 representa uma rota, que ocorre gradualmente e de uma maneira difundida, para um mundo mais sustentável e que segue o atingimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Segue a ideia de redução na utilização de recursos, uma quebra da atual história recente que apresenta países em desenvolvimento seguindo as rotas criadas por países desenvolvidos, não necessariamente precisando tornarem-se intensivos em recursos, com o investimento em tecnologias ambientalmente responsáveis e modificações nas estruturas tributárias levando a uma maior eficientização de recur-

[20] O Grupo de Trabalho II do IPCC avalia a vulnerabilidade dos sistemas socioeconômicos e naturais às mudanças climáticas, as consequências negativas e positivas das mudanças climáticas e as opções para sua adaptação.

[21] O Grupo de Trabalho III do IPCC se concentra na mitigação das mudanças climáticas, avaliando métodos para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e removê-los da atmosfera.

[22] *Representative Concentration Pathways*

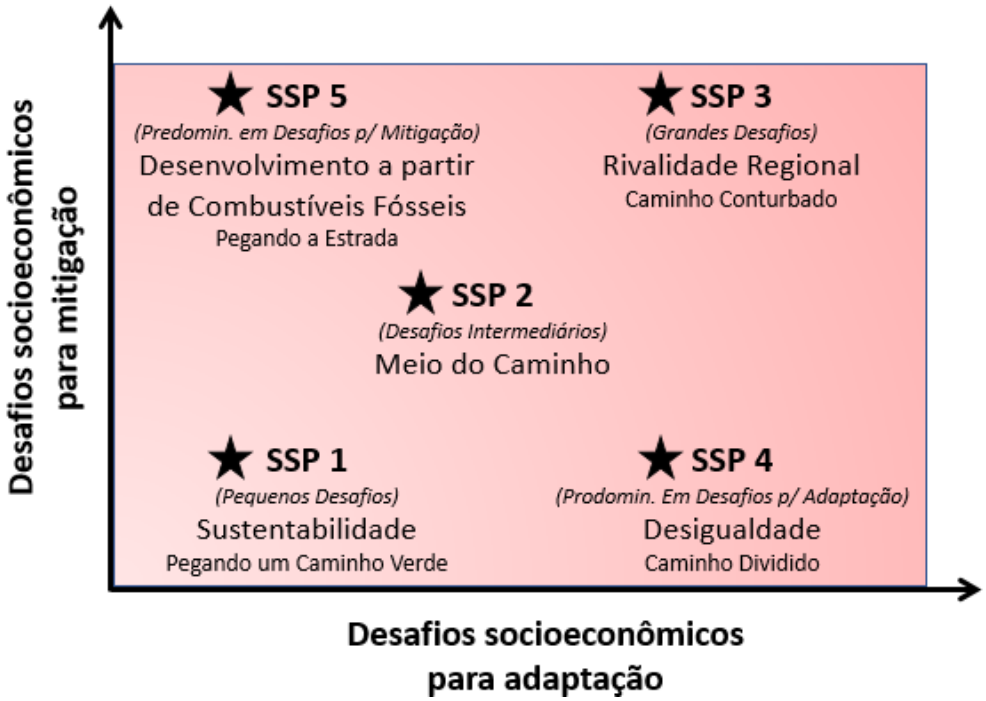


Figura 2.1: Desafios à mitigação e à adaptação nos SSPs
Fonte: Lucena *et al.* [82]

sos. Tem foco na equidade e não no crescimento econômico como objetivo dos países desenvolvidos, favorecendo a transferência tecnológica e financeira entre os países como maneira de propiciar um unificado crescimento sustentável global [18].

A narrativa do SSP2 é retratada pela inalteração da trajetória histórica das tendências sociais, econômicas e tecnológicas, caminhando para um mundo em que a receita e o desenvolvimento de países se dá de forma razoavelmente desigual, com alguns países fazendo um bom progresso e outros deixando de fazê-lo. É marcada pela estabilidade política das economias. As governanças internacionais e nacionais caminham para atingir altos níveis de sustentabilidade, entretanto o fazem de maneira lenta juntamente com melhorias de qualidade de vida, acesso à educação, à água e à cuidados médicos básicos. Melhorias tecnológicas ocorrem, porém nenhum salto tecnológico é alcançado e, mesmo isso acarretando em menor dependência de combustíveis fósseis, não há relutância em usá-lo. É uma trajetória dinâmica, não sendo utilizada nem como limite superior nem como inferior, mas sendo consistente com uma trajetória do meio do caminho entre estes limites, com muitas razões para ter tendências moderadas em seus elementos [18].

No cenário SSP3 as mudanças significativas ocorrem por preocupações locais de países sobre competitividade e segurança nacional e regional, causando uma ressurgência no nacionalismo. Os países focam em alcançar segurança alimentar e energética sem a

dependência de economias de fora da sua região, mesmo com isso causando uma redução no seu desenvolvimento. Isso possibilita o aparecimento de diversas formas de governos autoritários. Esta rota é marcada pelo lento desenvolvimento dos países, por ser intensiva em consumo material e com as desigualdades persistindo ou piorando com o tempo. Há aumento na dependência de combustíveis fósseis e uma crescente intensificação no uso de recursos, juntamente com uma lenta mudança tecnológica e a dificuldade em alcançar a cooperação internacional, que acaba por não priorizar causas ambientais, causando forte degradação ambiental em algumas regiões e baixo avanço em direção a sustentabilidade. É uma rota marcada por grandes desafios à mitigação e à adaptação [18].

O SSP4 retrata uma trajetória em que os investimentos em capital humano ocorrem de maneira desigual, em conjunto com disparidades nos custos de oportunidade econômicos e no poder político, causando um grande aumento na desigualdade e na estratificação tanto entre países quanto dentro deles. Com o passar do tempo, a desigualdade entre a população se intensifica e se concentra em dois grandes grupos: uma parcela da sociedade internacionalmente conectada que tem alto nível educacional e contribui para a para setores intensivos em capital e conhecimento, nos quais o desenvolvimento tecnológico se dá, e a outra parcela representada pela população com menor nível educacional e de baixa renda, trabalhando em setores de mão-de-obra intensiva e de baixo nível tecnológico. O crescimento econômico é moderado em países industrializados e de renda média, enquanto países de baixa renda ficam para trás, em muitos casos batalhando para fornecer acesso adequado à água, saneamento e cuidados de saúde para a população de baixa renda. As políticas ambientais se concentram em áreas de média e alta renda. A incerteza no mercado de combustíveis fósseis faz com que ocorra uma baixa no investimento de novos recursos, também causando uma diversificação na matriz energética dos países com tecnologias carbono intensivas e renováveis. É um cenário marcado com altos desafios à adaptação [18].

A rota do SSP5 é representada pelo sucesso econômico das economias industrializadas e emergentes, em um mundo que confia na competitividade do mercado, na inovação e na capacidade da sociedade de produzir um rápido avanço tecnológico e crescimento de capital humano voltado para o desenvolvimento sustentável. Um dos maiores *drivers* deste desenvolvimento se dá pela contínua utilização de recursos fósseis, acoplada à um estilo de vida energo intensivo pela sociedade, estes fatores levam à um rápido crescimento econômico. Nesta narrativa quase não há esforços para evitar os impactos globais da mudanças climáticas, dado o *trade-off* entre desenvolvimento e mitigação. Impactos locais são resolvidos com o rápido desenvolvimento tecnológico e há sempre a crença na capacidade de lidar com os impactos em sistemas ambientais e sociais,

incluindo a utilização de geoengenharia. Esta narrativa é marcada pelo alto desafio à mitigação [18].

Vários estudos já abordaram aspectos específicos do desenvolvimento dos SSPs, como rotas de urbanização, projeções de renda per capita, mudanças de dieta, entre outros. Alguns destes estudos estão listados a seguir.

Jiang e O'Neill utilizam os SSPs para descrever as diferentes rotas de urbanização pelo mundo, já que a urbanização é considerada como um importante elemento para estudos de mitigação, adaptação e impactos. Os autores elaboram projeções específicas de urbanização para cada linha narrativa dos SSPs, criando uma diferenciação da costumeira utilização de projeção única de urbanização entre diferentes cenários. Mostram que a urbanização global no final do século pode chegar a 60%, 79% e 92% para o SSP3, SSP2 e os SSP1/SSP4/SSP5, respectivamente [83].

Cuaresma utiliza um modelo econométrico com dados das últimas quatro décadas de diversas regiões e países para criar projeções de renda per capita para 144 países. São utilizados dados como nível de escolaridade, dinâmica de estrutura etária e crescimento econômico, juntamente com as projeções de população por idade, sexo e escolaridade de KC e Lutz [84], para criar estimativas até o final do século de renda per capita nas diferentes narrativas dos SSPs [85]. Já Rao *et al.* fazem uso das projeções de Cuaresma para estimar como podem se dar as projeções de desigualdade de renda nos SSPs, buscando enriquecer ainda mais as narrativas destes cenários. Em seu trabalho, avaliam que há maior desigualdade, até 2050, em países menos industrializados, e nas projeções dos cenários para o Brasil não indicam grande variação da desigualdade existente nos dias de hoje [86].

Lap *et al.* avaliam, através de um modelo de otimização por mínimo custo, o potencial da utilização de biomassa pelo Brasil até 2050, considerando a entrada deste energético no setor petroquímico e de aviação, competição entre energéticos e emissão de gases de efeito estufa. Para isso, criam diferentes suposições para os três primeiros SSPs, como diferentes *blends* máximos entre gasolina e etanol ou limites para entrada de captura de carbono no setor bioenergético, e chegam a resultados que variam entre 86 a 96% da utilização do potencial de biomassa brasileiro, utilizando biomassa para geração de eletricidade com captura de carbono, bioquerosene de aviação e rotas químicas com a utilização de etanol [87].

Soterroni *et al.* utilizam um modelo global de equilíbrio parcial, o GLOBIOM-Brazil, para simular a competição na utilização do uso do solo pela agricultura, floresta e setor bioenergético, sujeitos à limitação nos recursos, tecnologias e políticas restritivas. Em seu trabalho fizeram uso das narrativas dos SSP1, SSP2 e SSP3 com *drivers* exógenos de

evolução do PIB, população e possíveis mudanças de dieta. Diferenciaram também os focos das rotas, sendo o SSP1 uma evolução para um mundo mais sustentável, o SSP2 como um mundo mais próximo das tendências atuais e o SSP3 com um mundo mais fragmentado. Em seu estudo, utilizam diferentes projeções de melhora tecnológica para ganho de produção por cenário e comparam as projeções dos cenários entre si como análise de sensibilidade para a demanda de soja [88].

Arnell *et al.* estimam o impacto das mudanças climáticas utilizando parte da matriz de cenários apresentada em van Vuuren *et al.* [81], porém não considerando certas narrativas de alto forçamento radiativo com cenários mais sustentáveis. Com isso, estimam as consequências dos diferentes forçamentos climáticos como aumento da ocorrência de ondas de calor e de períodos de seca e fazem uso das narrativas dos SSPs para ilustrar os possíveis impactos socio econômicos das mudanças climáticas. Concluem que, em escala global, o único impacto que possivelmente não seria adverso seria no consumo energético para aquecimento, mas deve-se levar em conta as grandes incertezas para estimativas de longo prazo [89].

Com um foco maior no setor de transportes e o uso dos cenários dos SSPs podem ser citados os trabalhos de Rao *et al.* [90] e Bauer *et al.* [91]. Em Rao *et al.* são analisados os possíveis futuros da poluição local em cada trajetória dos SSPs, citando como a modificação na frota de veículos pode afetá-la. Já em Bauer *et al.*, são apresentados valores quantitativos para a matriz de energia primária de cada narrativa e também é argumentado como a diferenciação da frota pode alterá-la.

Com base na literatura disponível com as aplicações dos SSPs, O'Neill analisou mais de 650 trabalhos que fazem uso destas narrativas (informação verbal)[23]. Destes trabalhos, a narrativa do SSP2 é a mais utilizada pela literatura, seguida por algumas aplicações do SSP3 e 5, com os SSPs 1 e 4 sendo os menos explorados.

A partir desta informação é interessante citar que diversos trabalhos realizados por pesquisadores brasileiros investigam e utilizam somente o cenário do SSP2, por ser considerado como um cenário "meio do caminho". Utilizando estes mesmos preceitos macroeconômicos do SSP2, podem ser citados os trabalhos de Koberle *et al.* [92], sobre a tendência de modelos integrados fazerem a escolha de construção de mega projetos; o de Rochedo *et al.* [55], sobre como diferentes políticas de desmatamento podem acarretar em um sobrecusto para o Brasil; apresentações em congresso com as de Cunha *et al.* [93], sobre mudança de dieta; teses e dissertações como as de Rochedo [26], Koberle [94], Vásquez-Arroyo [95], Angelkorte [25] e Cunha [2]; e também trabalhos como o projeto

[23]Apresentação de Brian C. O'Neill no 12° encontro anual do *Integrated Assessment Modeling Consortium* (IAMC), Japão, 04 de dezembro de 2019.

do CD-Links[24] e o projeto LAMP[25].

Estas cinco narrativas servem como base para a construção de cenários neste trabalho e suas premissas são apresentadas no Capítulo 3, com o auxílio dos dados apresentados pelo relatório Elaboração de Nota Técnica sobre o Nexo Segurança Hídrica, Energética e Alimentar no Brasil em Diálogos com a Sociedade Civil [82].

Com isso, percebe-se uma lacuna na literatura sobre a utilização das outras rotas dos SSPs, com seus preceitos macroeconômicos e possíveis considerações por narrativa, como sua transformação de narrativa qualitativa em quantitativa [96]. Estas considerações podem acarretar em efeitos determinantes na infraestrutura energética para a evolução de tais cenários de longo prazo. Assim, torna-se importante apresentar algumas mudanças considerando a transição energética, como as fontes de energia renovável, o setor de transportes, bioenergia, entre outras.

2.3 Tecnologias inovadoras para um mundo de baixo carbono

Existem constantes ciclos de transição, dos mais primordiais aos mais tecnológicos, como a transição do nomadismo para o sedentarismo, ou do transporte à cavalo para o carro e até as mais recentes transições, como a do carvão para o petróleo. Como atribuído a Heráclito de Éfeso, tudo flui.

O avanço tecnológico ocorrido nos últimos anos causou transformações em diversos setores e agora contribui com mudanças disruptivas no setor energético. Há poucos anos, era impossível imaginar mudanças como o surgimento da rede elétrica inteligente, do *big data* aliado à inteligência artificial para maior controle da demanda e do consumo energético, do surgimento do *blockchain* usado no setor energético, da tendência de eletrificação e a grande redução do custo das tecnologias renováveis, como eólica e solar fotovoltaica [97, 98].

Desta forma, torna-se importante apresentar algumas destas tecnologias, pois são afetadas conforme a narrativa de desenvolvimento e, portanto, com os SSPs, além do

[24] O *Linking Climate and Development Policies - Leveraging International Networks and Knowledge Sharing* é um projeto que objetiva avaliar trajetórias nacionais e globais necessárias para a mudança de um paradigma energointensivo para uma transformação de baixo carbono, explorando sinergias entre Clima e Desenvolvimento.

[25] O *Latin America Modeling Project* faz parte de um projeto maior em que é estudado o papel de países em desenvolvimento no contexto das mitigações das mudanças climáticas e seus impactos. O foco na América Latina faz uso de modelos de análise integrada para gerar dados que sirvam para maior colaboração entre regiões e entre modelos regionais e globais.

seu possível impacto de utilização na evolução da matriz energética brasileira no longo prazo. São também explorados brevemente os elementos mais importantes que norteiam o impacto das narrativas do ponto de vista tecnológico. Deste modo, algumas premissas são exploradas com maior detalhamento no Capítulo 3.

2.3.1 Geração renovável de eletricidade

A capacidade instalada de energia de fontes renováveis no Brasil cresceu aproximadamente 60% entre 2009 e 2018, com participação significativa das fontes eólica e solar fotovoltaica, representando 33% deste valor [99]. Além de ser uma fonte energética representativa no Brasil [100], é cotada como uma das principais alternativas para redução de gases de efeito estufa, além de contar com uma recente redução no custos [101–104].

Segundo o IRENA, a partir do ano de 2020 o custo nivelado de geração elétrica da eólica *onshore* e fotovoltaica deve chegar abaixo do custo da fonte fóssil mais barata [105]. Parte desta rápida queda nos custos se dá pela grande ascensão chinesa como produtora e exportadora destas tecnologias [106]. No relatório do IRENA, ainda é citada a elevada queda de preço em tecnologias como a heliotérmica e eólica *offshore* [105], mostrando que há uma tendência de maior entrada destas fontes no mundo.

As energias renováveis são ainda mais importantes no contexto das mudanças climáticas globais, pois tais tecnologias podem substituir fontes fósseis e são de grande importância para cenários muito restritivos em emissões de gases de efeito estufa [34]. Em alguns destes cenários há uma forte tendência de eletrificação, que é mais discutida posteriormente, e isso acentua a importância da utilização de fontes mais limpas na geração elétrica.

Estas fontes de energia contam com algumas limitações, como a necessidade de utilização de metais raros em seus componentes [107], a sua intermitência que cria a necessidade de tecnologias de armazenamento [108], problemas que começam a surgir como a curva de pato[26] que causa demanda por energia de reserva [108, 109], causam expansão do sistema de transmissão para áreas com alto potencial renovável que pode acarretar em um congestionamento neste sistema [108, 110] e podem acarretar na morte de animais [102, 111, 112]. Além disso, existe a percepção individual sobre tais tecnologias no ambiente, que pode acarretar em perda de receita devido a redução no turismo de certos

[26] A curva de pato foi observada pela primeira vez no estado americano da Califórnia e obteve este nome devido à semelhança da curva gerada pela diferença de demanda elétrica e geração fotovoltaica. Esta é causada pelo aumento da oferta de eletricidade por fontes solares durante o dia, que faz com que fontes não solares possam reduzir sua geração e quando o sol está a se pôr no horizonte, estas precisam aumentar rapidamente a sua produção, o que necessita um demasiado *ramp up*.

locais, causados pela poluição sonora e visual [113, 114] e por sua suscetibilidade quanto aos efeitos das mudanças climáticas [115–117].

Nos SSPs podem se diferenciar pela preferência no seu uso, acarretando em maior geração a partir destas fontes em cenários mais sustentáveis ou com maior participação destas fontes devido ao seu uso acoplado com renováveis não intermitentes, como a energia solar concentrada [45, 118].

2.3.2 Captura e armazenamento de carbono

Outro ponto estrutural identificado como decisivo para que o setor energético possa de fato atingir cenários restritivos de emissões de gases de efeito estufa é a decisão pelo investimento em tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS)[27]. A capacidade instalada de plantas de CCS de larga escala cresceu em 34% desde 2017 [120]. Segundo a Agência Internacional de Energia, para o alcance da meta climática de 2°C até 2050, o CCS possivelmente será responsável por uma redução de até 12%, ou 94 Gt de CO_2, nas emissões acumuladas de GEE. O CCS é uma solução de mitigação essencial para o setor industrial, visto que é uma das únicas tecnologias capazes de reduzir consideravelmente as emissões dos principais processos industriais, como produção de aço, cimento e produtos químicos [121].

Neste contexto, o processo de biomassa com captura carbono e armazenamento (BioCCS[28]) pode ser ainda mais relevante, devido ao fato de possibilitar um balanço negativo de emissões que por sua vez, segundo o Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas, irão tornar-se cada vez mais importantes em cenários de mitigação mais ambiciosos. Os mercados internacionais de carbono podem ser uma boa oportunidade de geração renda aos países que apresentarem emissões negativas [122].

O processo de captura de carbono pode ser utilizado em plantas estacionárias de energia, como termelétricas a óleo, carvão e gás, e no setor industrial, como citado anteriormente. Seu uso, porém, é muito caro, com alta penalidade energética e ainda deve levar em conta problemas logísticos de transporte e injeção de CO_2 [119, 123, 124].

Além disso, as plantas existentes podem apresentar dificuldades para serem converti-

[27]Existem quatro principais rotas para captura de carbono que se resumem em pré-combustão, oxi-combustão, pós-combustão e *looping* químico e envolvem, respectivamente, a separação do CO2 de um gás antes da combustão ser realizada, a queima do combustível com um gás enriquecido de oxigênio garantindo a concentração do CO_2, a remoção do CO_2 por meio de solventes específicos e reações de oxidação e redução em estágios, a serem escolhidas conforme as características de sua aplicação [119].

[28]O termo BioCCS (*Biomass use with carbon capture*) é tomado como preferência neste texto por ser uma terminologia mais geral do que o termo BECCS (*Biomass Energy use with carbon capture*), que engloba somente o uso energético da biomassa.

das devido à necessidade de grande disponibilidade hídrica e espaço para implementação do equipamento de captura [125]. Para isso, existe o conceito de plantas *Capture Ready*, que pode ser utilizado em novas plantas que já levam em conta no seu projeto a possível instalação de um sistema de captura de carbono [126].

Além das dificuldades estruturais e tecnológicas, há o problema da aceitação social do CCS, pois o uso de tal tecnologia pode prolongar a utilização de combustíveis fósseis e há também a desconfiança sobre o armazenamento subterrâneo do CO_2, seja por medo de atividade sísmica ou contaminação de aquíferos subterrâneos [127].

Mas, apesar das dificuldades enfrentadas por estas tecnologias, elas se fazem de extrema importância na modelagem de cenários com limite de emissão para atingir 2°C e 1,5°C [128], e há cenários que somente com a utilização de BioCCS se faz possível chegar em 1,5°C [34, 128]. Porém, em cenários não tão restritivos, isto é, com a possibilidade de *overshoot*[29], a utilização de tais tecnologias pode atrasar a saída de fontes fósseis e a entrada de grandes modificações no sistema energético [129, 130].

2.3.3 Veículos do setor de transportes

Em 2018, o setor de transporte foi responsável por 32,8% do consumo energético do Brasil, além de representar 60% do consumo de derivados de petróleo, em termos energéticos [100]. Tais valores representam como o setor de transportes está associado à cadeia de petróleo, além de ser energointensivo. Tendo em vista as diferentes alternativas tecnológicas aplicáveis ao setor de transporte, entende-se que o futuro deste setor se mostra como um ponto importante para a evolução da cadeia energética nacional.

É visível o movimento global da eletrificação da frota de veículos [131, 132], que pode vir de uma série de tecnologias. Neste trabalho, tais tecnologias são divididas em veículos puramente elétricos, elétricos a pilha a combustível e híbridos e é considerada a possível transição para estes veículos [133, 134]. Tais tecnologias estão em um nível razoável de desenvolvimento tecnológico, faltando somente a fase de maturação e competitividade para fixarem-se no mercado. Para isto, estas tecnologias dependem também do desenvolvimento da infraestrutura necessária para sua entrada, como gastos robustos na rede elétrica e rede de transporte de hidrogênio [135, 136]. Desta forma, veículos elétricos que não dependem desta infraestrutura se mostram de relevante interesse para o mercado brasileiro, principalmente ao se levar em conta a capacidade de utilização do etanol, dada a infraestrutura já existente do setor sucroalcooleiro no Brasil.

[29]Este ocorre quando, em cenários de limitação de emissãoa, é possível ultrapassar o patamar limítrofe para, posteriormente, atingir o nível desejado de emissões.

Os veículos puramente elétricos, híbridos a gasolina e a pilha a combustível a hidrogênio são extensivamente discutidos na literatura e contam com diversos modelos a venda [137–141], então não são aqui explicados. Existem duas tecnologias que merecem uma breve apresentação, como o veículo híbrido *flex* e o veículo a pilha a combustível a etanol, este podendo fazer uso do etanol diretamente na pilha ou utilizar um reformador embarcado no veículo para gerar hidrogênio.

O veículo híbrido *flex* funciona de maneira análoga ao veículo híbrido convencional, sendo que antes do seu aparecimento diversas misturas de etanol na gasolina foram testadas no motor convencional [142], porém este conta com a possibilidade do uso exclusivo de etanol. O Brasil é o primeiro lugar no mundo a vender um veículo deste tipo, dada a importância dos veículos *flex* na frota brasileira [143].

Já o veículo a pilha a etanol com reforma embarcada ou com etanol direto estão em uma fase inferior de desenvolvimento, sendo que o primeiro já foi testado por uma montadora japonesa no Brasil, que montou um sistema composto por um reformador, um tanque de combustível, uma pilha a combustível de óxido sólido, um motor elétrico e uma bateria, com um resumo de seu funcionamento apresentado na Figura 2.2. Neste sistema o reformador embarcado recebe o etanol do tanque e o transforma em hidrogênio e este é conduzido para a pilha a combustível, onde é consumido juntamente com o oxigênio do ar para produzir a carga elétrica que carrega a bateria que, por sua vez, alimenta o motor elétrico enviando potência mecânica às rodas e permite a movimentação do veículo [144].

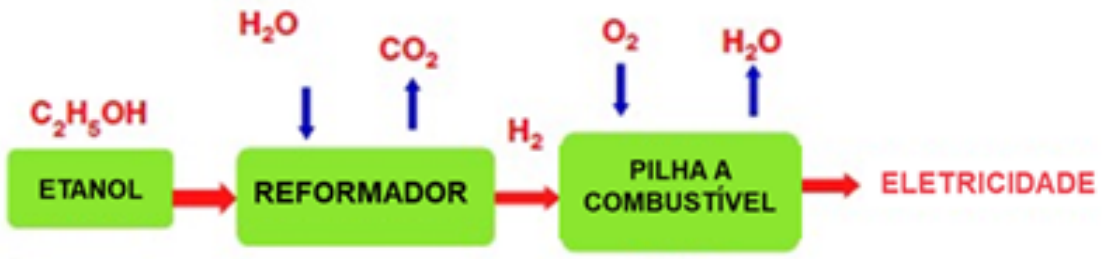


Figura 2.2: Esquema de funcionamento do veículo elétrico a pilha a combustível a etanol

Fonte: Elaboração própria

A tecnologia de reforma de etanol para produção do hidrogênio já é tecnologia dominada. O desafio deste veículo refere-se à incorporação do reformador em um veículo considerando o espaço necessário para sua inclusão, o peso do reformador, entre outros.

A segunda tecnologia está associada à alimentação direta de etanol na pilha, sem

a necessidade da sua reforma, ou seja, o próprio biocombustível alimenta o anodo na reação gerando a carga necessária para carregar a bateria [145], com o processo químico mostrado abaixo.

$$Anodo : C_2H_5OH + 3H_2O \rightarrow 12H^+ + 12e^- + 2CO_2$$

$$Catodo : 3O_2 + 12H^+ + 12e^- \rightarrow 6H_2O$$

$$Final : C_2H_5OH + 3O_2 \rightarrow 3H_2O + 2CO_2$$

A vantagem desta tecnologia em relação à primeira se dá, principalmente, por ser mais compacta, todavia atualmente possui menor eficiência de conversão termoquímica, com perspectivas de aumento com o seu desenvolvimento e a possibilidade de utilização dos 12 elétrons de sua oxidação completa, além de ainda enfrentar problemas na sua operação, como *crossover* de combustível[30] e a poluição do catalisador [146–148].

Algumas das tecnologias mostradas anteriormente apresentam um problema em comum que é seu elevado custo ao compará-las com tecnologias existentes [140, 149–151]. Tal problema, aliado à falta de infraestrutura, demasiado tempo de abastecimento e custo do combustível, acarretam na redução de procura por tais veículos. Deste modo, levar em conta a variação desses custos e a preferência do consumidor em cenários não é uma análise trivial, sendo criados modelos exclusivos para tais análises [152–154]. E ainda há a disposição do consumidor na troca do modal, ou seja, passar a usar mais o transporte coletivo do que o individual e vice-versa [155].

2.3.4 Bioenergéticos

O setor bioenergético é de grande importância para o Brasil, dado sua participação na oferta de energia primária. Em 2018, a participação de bioenergia, distribuída entre lenha, carvão-vegetal e derivados de cana de açúcar, foi de 24,4% [100]. Também vale destacar a participação significativa dos biocombustíveis, em especial o etanol, dada a sua histórica utilização como mistura na gasolina, reduzindo a dependência brasileira por derivados internacionais [156].

A participação de biomassa e bioenergéticos pode vir a se tornar ainda mais intensa, principalmente ao se levar em conta cenários de restrição de emissões [157, 158], em que se faz necessária a utilização de biocombustíveis associados ao CCS e que o Brasil se encontra em uma posição privilegiada por ser um grande produtor de etanol e pela faci-

[30] O *crossover* do combustível seria o transporte do etanol do anodo para o catodo, reduzindo significativamente a eficiência da pilha.

lidade associada à captura de carbono no processo de fermentação deste biocombustível [159]. Quanto à isso, há o desafio entre potencial de oferta de bioenergéticos e alimentos, pois há um limite físico para a produção de ambos, além da restrição por disponibilidade hídrica [160, 161]. Além disso, há o problema associado à produção de monoculturas, como a infertilização do solo e impactos a biodiversidade como um todo [162, 163].

O cenários dos SSPs não se restringem a ditar narrativas para alterações no uso do solo. Porém é possível definir uma relação entre a área necessária para o plantio alimentar e o perfil de consumo de cada cenário, além da abertura do mercado internacional, que afetaria a quantidade de área utilizada para a exportação de produtos agrícolas.

Já no quesito florestal, podem ser realizadas avaliações semelhantes, como a de preservação para cenários mais sustentáveis e a possibilidade de florestamento para cenários restritivos em emissões, de maneira análoga ao visto em Rochedo *et al.* [55].

A partir da apresentação dos modelos de análise integrada e descrição dos cenários SSPs e modificações estruturais em setores energéticos, o próximo capítulo apresenta o modelo integrado no qual este trabalho é baseado. São também ilustradas as modificações realizadas no mesmo, assim como as premissas para os cenários e algumas das limitações da metodologia aplicada.

Capítulo 3

Método Proposto

Neste capítulo é exposta a plataforma no qual o modelo utilizado neste trabalho está inserido, seguido pela apresentação do modelo, com uma breve explicação sobre sua estrutura e as modificações realizadas no mesmo. A partir disso, são exibidas as premissas para a construção dos SSPs em um modelo nacional.

3.1 MESSAGE

O MESSAGE (*Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental impact*) é um modelo de programação linear inteira mista, criado no IIASA (*International Institute for Applied Systems Analysis*), com o intuito de substituir dois modelos anteriores, o modelo Häfele-Manne e o Suzuki [164, 165]. Dentre as adições mais importantes ao compará-lo com seus predecessores, podem ser citadas a inclusão do limite de utilização de recursos, a utilização de curvas de demanda e o cálculo de emissões no ambiente [51, 166].

No ano 2000 a IAEA (*International Atomic Energy Agency*) adquiriu o MESSAGE e o atualizou, permitindo uma avaliação mais detalhada de estratégias para alternativas energéticas, além de criar uma interface gráfica com o intuito de tornar sua utilização menos complexa [167].

A metodologia do programa é baseada na otimização de uma função objetivo que está sujeita à restrições, como limites na extração de recursos, disponibilidade de combustíveis, tempo de penetração no mercado para novas tecnologias e emissão de poluentes. E, com isso, torna-se uma possível forma de avaliar diferentes estratégias para o atendimento da demanda [137]. É um modelo de análise integrada, ou seja, capaz de minimizar os custos de um sistema como um todo, mas não necessariamente minimizando os cus-

tos de setores individuais, levando em consideração os efeitos indiretos de uma restrição setorial em outros setores [26, 94].

O MESSAGE utiliza fluxos de energia que passam por diferentes níveis da cadeia energética até chegar no nível final, que atende uma demanda exógena ao programa, ou seja, inserida pelo modelador. Para realizar a passagem de um nível de energia para outro, são necessárias tecnologias que realizem essa transformação utilizando dados como eficiência de conversão, valor de investimento, gastos com operação e manutenção, capacidade histórica, etc., sabendo que normalmente existem mais de uma tecnologia que competem entre si para realizar a mesma conversão. Como um possível exemplo seria o carvão betuminoso como recurso e a extração como mineração a céu aberto e a subterrânea como tecnologias que competem entre si e cada uma com suas especificidades, que são utilizadas para transformar esse recurso em um carvão de nível de energia primária, que pode ser utilizado por uma termoelétrica para gerar eletricidade ou pode ser queimado para gerar calor, atendendo a diferentes demandas. A Equação 3.1 apresenta o princípio matemático do MESSAGE:

$$minZ = \sum_{t=1}^{k} \left[\sum_{j=1}^{m} \frac{(R_j \cdot CE_j)_t}{(1+d)^{(k-t)}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{(P_i \cdot CI_i)_t + (E_i \cdot COM_i)_t}{(1+d)^{(k-t)}} \right] \tag{3.1}$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^{n} E_{i,l,t} \geq D_{l,t}, \qquad (l = 1, ..., a);\ (t = 1, ..., k)$$

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max}, \qquad (i = 1, ..., n)$$

$$E_i^{min} \leq E_i \leq E_i^{max}, \qquad (i = 1, ..., n)$$

$$\sum_{t=1}^{k} R_{j,t} \leq R_j^{total}, \qquad (j = 1, ..., m)$$

$$E_i^{min} \leq P_i \cdot FC_i, \qquad (i = 1, ..., n)$$

Em que k representa o período de análise, m é a quantidade de recursos disponíveis, n representa a quantidade de tecnologias de conversão no modelo, d é a taxa de desconto, R é a energia extraída do recurso j no ano k, CE é o custo unitário de extração do recurso j no ano k, P é a potência instalada da tecnologia i no ano k, CT é o custo unitário de instalação da tecnologia i no ano k, E representa a energia produzida pela tecnologia i no ano k, COM é o custo unitário de operação e manutenção da tecnologia i no ano k,

D é a demanda final de energia do energético l no ano k, a é a quantidade de energéticos utilizados em sua forma final e FC é o fator de capacidade da tecnologia i no ano k.

A taxa de desconto de todos os segmentos do setor energético é única, sendo esta uma informação importante, visto que a taxa influi na escolha de opção de geração de menor custo na medida em que é usada ao realizar a comparação entre as diferentes tecnologias e seus custos dispersos ao longo do tempo [137].

3.2 BLUES

O BLUES (*Brazil Land Use and Energy Systems model*), previamente conhecido como Message_Brazil; MSB300 e MSB8000, é um modelo de otimização integrada brasileiro, que utiliza o MESSAGE como plataforma. Sua primeira versão surgiu em 2006, criada pelo grupo de trabalho do laboratório Cenergia[1], e foi utilizado para a produção de diversos estudos, como o "*Brazil: A Country Profile on Sustainable Energy Development*", em parceria com a USP e a IAEA [168].

Foram diversas versões do Message_Brazil, em que cada estudo realizado pelo grupo adicionava novas informações no modelo, tornando-o mais complexo. Borba [137] restruturou o modelo, fazendo com que o mesmo fosse, posteriormente, conhecido como MESSAGE-Brazil 300 (MSB300).

O MSB300 tem como ano base o ano de 2008, sendo 2010 a 2040 seu horizonte de análise com intervalos de 5 em 5 anos. São considerados 4 trimestres por ano e 5 blocos horários por dia (0-6h; 6-10h; 10-18h; 18-21h; 21-24h), com uma taxa de desconto de 10%. Nesta versão foram inseridos veículos elétricos e híbridos *plug-in*, sazonalidade na oferta de energia hídrica e eólica e inclusão de uma curva de carga elétrica. São consideradas 3 regiões, com seus subsistemas e seus possíveis intercâmbios energéticos. O número 300 do nome do modelo é utilizado para representar as quase 300 tecnologias inseridas no modelo [137, 169–171].

Posteriormente o modelo foi adaptado, com o intuito de detalhar as diferentes regiões do país e as opções de eficiência energética e mitigação de gases de efeito estufa endógenas nos setores de uso final, esta versão ficou conhecida como MESSAGE-Brazil 8000 (MSB8000).

Esta versão do modelo foi utilizada para no relatório Opções de Mitigação [172], cujo objetivo foi auxiliar a implementação de ações de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores chave brasileiros. Trataram-se das estimativas dos potenciais e custos

[1] O Centro de Economia Energética e Ambiental é um laboratório ligado ao Programa de Planejamento Energético da Coppe (http://www.cenergialab.coppe.ufrj.br/).

de abatimento para os segmentos de energia, edificações, de alternativas transversais e entre outros setores no período 2012-2050. Para isso, o projeto permitiu detalhar os diversos setores do antigo MSB300, fazendo com que este se tornasse o MSB8000.

O MSB8000 tem como ano base o ano de 2010, sendo seu horizonte de análise até o ano de 2050, em intervalos de 5 em 5 anos. A sazonalidade é mensal e a curva de carga diária de 24 horas, com uma taxa de desconto de 10%. O modelo é composto pelas cinco regiões brasileiras e uma região denominada Brasil. O número 8000 do nome do modelo é utilizado, assim como no MSB300, para representar as quase 8000 tecnologias existentes no modelo [95, 171, 172].

Diversos trabalhos utilizaram as versões supracitadas do MESSAGE-Brazil, podem ser citados como referências os trabalhos de [26, 95, 137, 169, 172–179].

A versão atual do modelo é conhecida como BLUES, e tem como diferencial a inclusão de agricultura, florestas e outros usos do solo, acoplados ao modelo energético via insumos bioenergéticos, como cana de açúcar para etanol ou bioeletricidade, soja e gordura animal para biodiesel, e material lignocelulósico como matéria-prima para bioeletricidade ou etanol de segunda geração ou BTL (*biomass-to-liquid*). Novas tecnologias de biocombustíveis avançados são introduzidas, como a rota ATJ (*alcohol-to-jet*) implementada como uma unidade complementar às destilarias de etanol existentes e a possibilidade dese usar até 20% de biodiesel em misturas de bunker maritmo. Foram atualizadas algumas premissas como custo de veículos elétricos e sua penetração a partir de dados mais atuais e a penetração da fonte eólica [25, 55, 94].

Além disso, foram adicionados os principais produtos agrícolas do Brasil conforme especificado pela FAO, que dispõe de 18 tipos de cultivo agrícola e 4 tipos de produtos da pecuária: gado de corte, gado leiteiro, galinhas poedeiras e outros animais de corte, representado no modelo como frango. Esta premissa ocorre pelo modelo considerar a produção pecuária por unidade de cabeça de animal e não peso consumido, com a avicultura representando grande parte de todas as cabeças de animais (excluindo gado de corte), desconsidera-se, então, as demais criações pecuárias [94]. Angelkorte [25] atualizou parte destes produtos agrícolas e suas demandas.

As regiões, ano-base, horizonte de análise, sazonalidade, curva de carga e taxa de desconto são as mesmas da versão MSB8000, sendo que a divisão regional e suas interligações podem ser vistas na Figura 3.1. Como parte do intuito deste trabalho é a expansão do horizonte de análise do modelo para o ano de 2100, faz-se necessária a exposição dos diferentes setores existentes no mesmo e as demandas que devem ser atendidas.

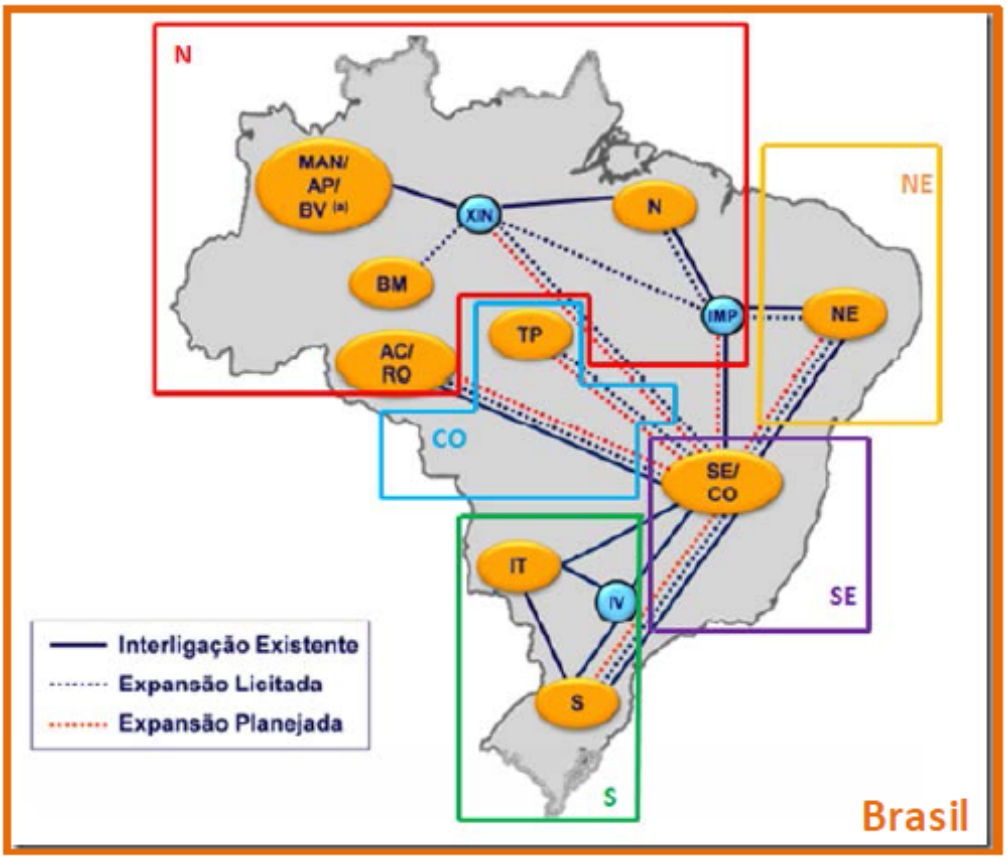


Figura 3.1: Detalhamento das regiões do BLUES e suas interligações
Fonte: Koberle [94]

Para maiores informações sobre o modelo, pode ser utilizado o banco de dados do IAMC [180], o trabalho de Rochedo *et al.* [55], a tese de doutorado de Koberle [94] e Vásquez-Arroyo [95], a dissertação de Angelkorte [25] e o relatório de Lucena *et al.* [82]. Deste modo, neste trabalho não são apresentadas as modificações realizadas nestes estudos, focando apenas no que é modificado e alterado no modelo e nas alterações necessárias para o estudo de caso.

Estes trabalhos citados anteriormente tiveram foco no uso de solo, energia, agricultura, uso de água, segurança hídrica, alimentar e energética, e há muito não é realizado um trabalho com foco no setor de transportes e industrial, pois independente do grande desenvolvimento do modelo, estes setores acabaram por não serem revisitados.

Apresentado o funcionamento do modelo e referências de suas aplicações, podem agora ser apresentados os setores existentes no BLUES, a começar pelos setores que não sofreram significativas modificações no decorrer deste trabalho, como o de edificações, uso do solo, resíduos e energético, porém devem ser citados por serem complementares

às análises realizadas.

O setor de edificações engloba o setor residencial, comercial e público. Seu uso final é representado pela demanda por iluminação, condicionamento de ar, condicionamento de alimentos, cocção, aquecimento de água e serviços energéticos gerais. Para atender a demanda deste setor pode ser usada eletricidade, gás natural, gás de cidade, óleo combustível, diesel, biomassa ou carvão vegetal, dependendo do seu uso final. Neste setor existe um portfólio de tecnologias alternativas que levam em conta eficientização das tecnologias existentes ou redução da demanda. Neste caso, estão incluídas tecnologias como lâmpadas de LED eficientes, energia fotovoltaica distribuída e aquecedores solares [55, 181, 182]. Diferentes pessoas estão trabalhando com este setor e em breve devem ser apresentados trabalhos com melhorias no mesmo.

O setor de uso do solo inclui sistemas de florestas, savanas, pastos de alta e baixa produtividade, sistemas integrados de lavoura-pecuária-floresta, lavoura, plantio duplo, florestas plantadas e áreas protegidas. Nas áreas de plantio são considerados os produtos agrícolas mais relevantes para o Brasil como a soja, cana, arroz, milho, entre outros [25, 55, 94]. O setor de resíduos agrícolas existe de maneira endógena no modelo e considera a disposição de dejetos animais e incineração de restos de cultivos agrícolas. Neste setor é possível queimar o resíduo, reaproveitá-lo como biofertilizante ou tendo como destinação final o próprio campo em que foi produzido, porém com maior emissão de metano [183].

O setor de resíduos se divide em resíduos sólidos urbanos e efluentes. Os resíduos sólidos urbanos se dividem em lixões, aterros sanitários, aterros controlados, com suas respectivas opções de maior controle de emissão. São também consideradas opções como reciclagem, incineração e biodigestão para a redução de emissão deste setor, além da incineração para resíduos sólidos hospitalares. O setor de efluentes considera a necessidade de utilização do tratamento deste resíduo e seu consumo energético, bem como a possibilidade do seu aproveitamento para a produção de biometano [183].

O setor energético engloba o setor de geração elétrica a partir de fontes renováveis, setor de óleo e gás, a indústria de carvão, termoelétricas e biocombustíveis. No setor de fontes renováveis, são consideradas fontes geradoras como a hídrica, a eólica, a solar fotovoltaica centralizada[2] e a solar térmica; o setor de óleo e gás compreende desde a explotação do petróleo ao seu *upstream*, considerando a produção no pré e no pós-sal e a extração de gás; a indústria de carvão, que contém a extração deste minério a partir de minas a céu aberto e minas subterrâneas; as termoelétricas que abrangem a utilização

[2] A fotovoltaica descentralizada está inserida no setor de edificações.

de carvão, óleo e gás natural para geração de eletricidade, podendo fazer uso da captura de carbono, até as termonucleares; e o setor de biocombustíveis, que assimila a produção de biodiesel e o setor sucroalcooleiro [184–188].

Nas seguintes subseções são apresentados os setores em que ocorrem alterações significativas com este trabalho, sendo que as suas modificações e alterações para a inclusão dos SSPs são descritas nas próximas seções.

3.2.1 Setor industrial

O setor industrial é o segundo setor em consumo energético no país, tendo sido responsável por 31,7% do consumo de energia final no ano de 2018. Este se encontra em terceiro lugar nas emissões estimadas de CO_2eq para o ano de 2018 e, considerando as emissões de não energéticos como AFOLU, representa 18,8% das emissões brasileiras de CO_2eq [100]. Pode ser considerado, então, um setor com papel relevante para a mitigação das emissões de GEE [172, 189].

Os setores industriais existentes no BLUES estão descritos nos relatórios de Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil [190–200], sendo esta a bibliografia indicada com os dados em que o modelo está baseado.

A Tabela 3.1 expõe, resumidamente, como estão representadas as demandas da indústria no modelo, de forma direta ou indireta. Estas demandas são agregados de atividades industriais, como o calor para alimentos e bebidas, que representa a demanda por aquecimento direto, como operações de assar e tostar, e a demanda por calor de processo, como cozimento, destilação e pasteurização.

Essas demandas agregadas deste setor são atendidas a partir de cerca de quase 200 tecnologias de produção e medidas de mitigação no modelo, como apresentado na Figura 3.2.

Sobre este setor, algumas informações importantes podem ser citadas, como a não inclusão do subsegmento de açúcar na indústria de alimentos e bebidas, visto que este é analisado juntamente com o setor de biocombustíveis, ou como a demanda do setor de cimento ser traduzida na demanda por clínquer, ou como a participação de produtores independentes de ferro-gusa é menor do que pela rota integrada, mas seu consumo energético é significativo por não haver tanto aproveitamento energético [190, 191, 193].

Tabela 3.1: Demandas do setor industrial no BLUES

Setor	Eletricidade	Calor	Vapor	Produto
Química	O	X	O	X
Papel e celulose	O	O	O	X
Cimento	O	O		X
Ferro-gusa	O	O		X
Alimentos e bebidas	X	X	X	
Metalúrgica	X	X	X	
Ferroligas	X	X		
Metais não ferrosos	X	X		
Cerâmica	X	X		
Mineração	X	X		
Outros	X	X		
Têxtil	X		X	

Fonte: Elaboração própria

Nota: O para demanda indireta; X para demanda direta.

3.2.2 Setor de transportes

O setor de transportes no BLUES é separado em transporte de passageiro e transporte de carga. O transporte de passageiros é dividido em três modais, sendo considerado o transporte rodoviário, ferroviário e aéreo e cuja participação dominante se faz pelo transporte em rodovias. A distribuição modal do transporte de carga é realizada de forma majoritária pelo transporte rodoviário, porém tendo representativa participação do transporte ferroviário. A cabotagem, o transporte hidroviário e dutoviário têm também significativa importância no transporte de carga, diferentemente do transporte aéreo de carga, cuja participação é praticamente nula [201].

Para o transporte de passageiros, existe a opção de veículos leves, motocicletas, comerciais leves e ônibus, com diferentes opções de combustível presentes para cada veiculo, como carros a gasolina, etanol, *flex*, elétricos ou comerciais leves a gasolina, *flex*, diesel, entre outros. Para o transporte de cargas existem comerciais leves, caminhões semileves, leves, médios, semipesados e pesados, sendo que existem estes veículos a diesel comuns e eficientes, também é considerado o transporte por navio e trem. A Figura 3.3 consolida as informações aqui citadas, além de apresentar a existência do fator de ocupação médio de cada veículo e modal para atender a demanda de passageiro-quilômetro (pkm) e tonelada-quilômetro útil (tku).

Este setor no BLUES conta com 174 diferentes tecnologias para o transporte de passageiros e 72 para o transporte de carga, além de cinco fatores de ocupação pra o

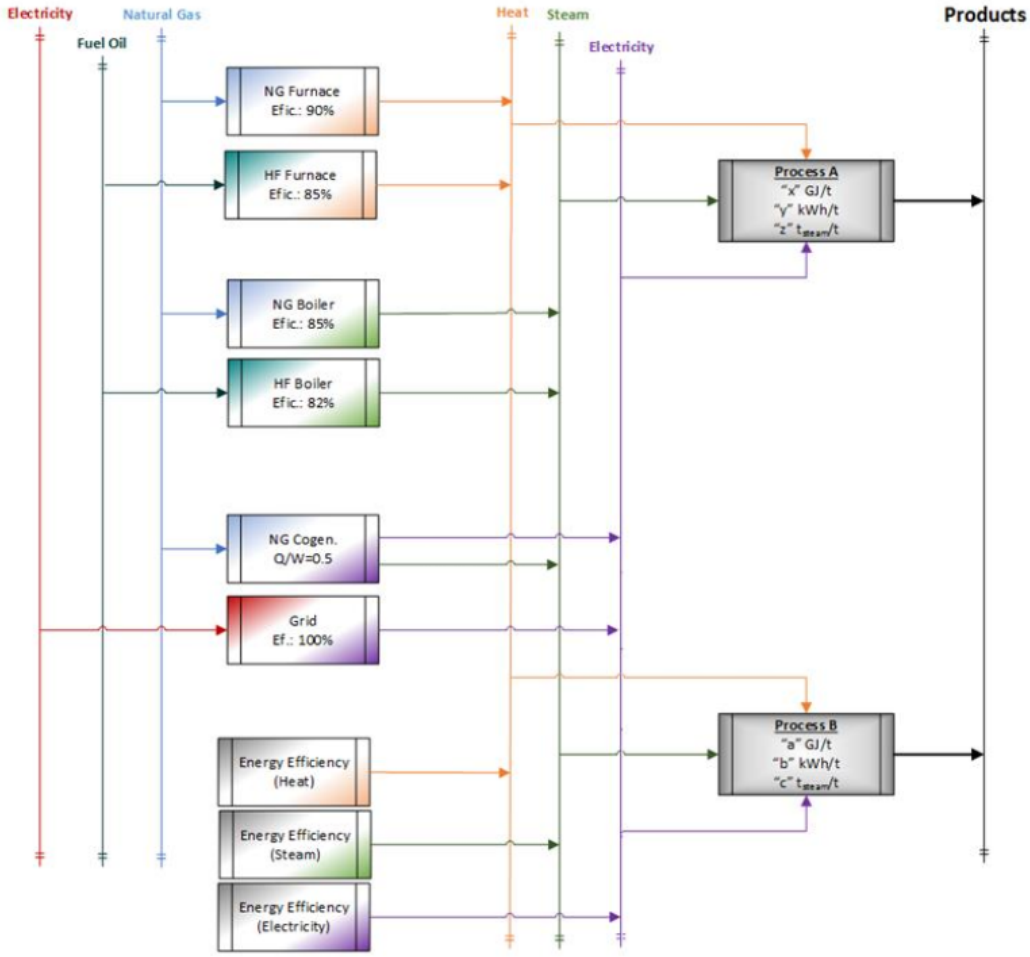


Figura 3.2: Exemplo de fluxo de transformação do setor industrial para o atendimento da demanda

Fonte: Rochedo *et al.* [55]

transporte de passageiro e seis fatores de ocupação para o transporte de carga.

A partir disso o modelo, por ser um modelo de análise integrada, realiza a otimização de mínimo custo, considerando o preço de cada veículo, a cadeia produtiva dos combustíveis, o uso do solo para o plantio e produção do etanol, entre outras coisas, assim atendendo a demanda de passageiro-quilômetro e a de tonelada-quilômetro útil.

Apresentado o BLUES, os setores que são modificados neste trabalho e seus demais setores, na próxima seção são apresentadas as modificações realizadas no modelo BLUES.

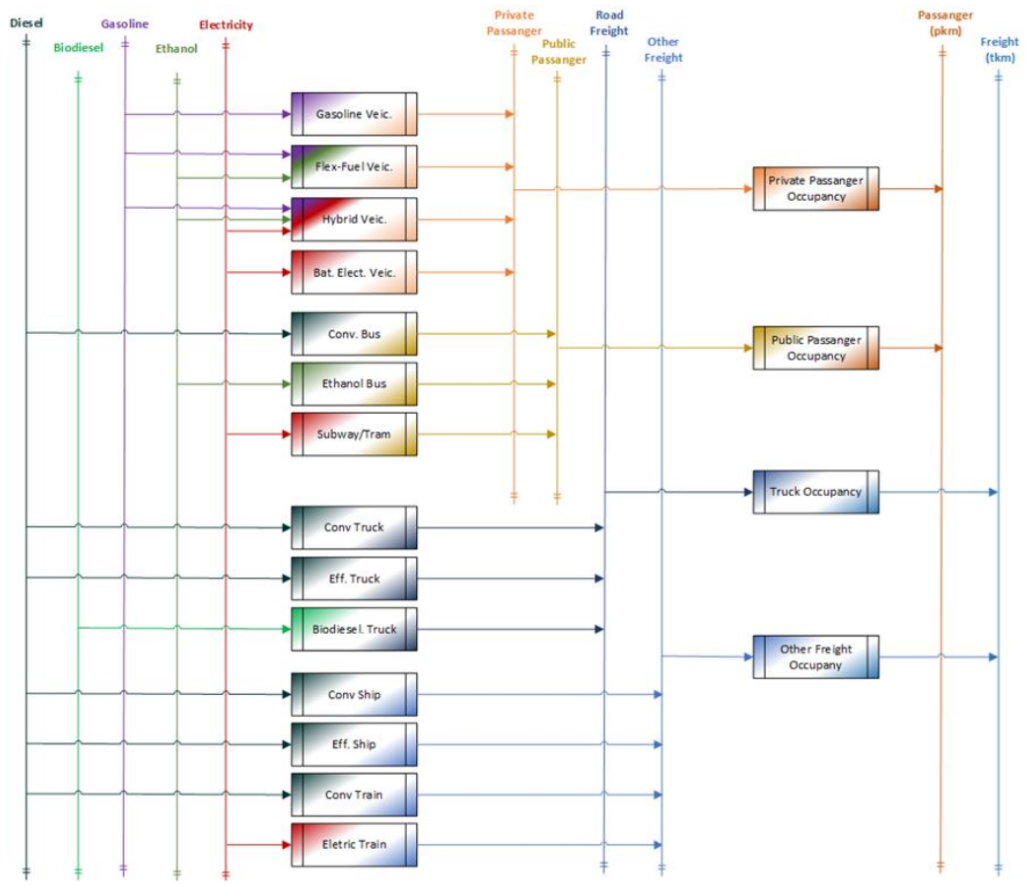


Figura 3.3: Exemplo do fluxo de transformação do setor de transportes para o atendimento da demanda

Fonte: Rochedo *et al.* [55]

3.3 Modificações transversais no modelo BLUES

Nesta seção são apresentadas as modificações que, de alguma maneira, são consideradas para diversos setores, sendo utilizadas de maneira transversal sobre eles, como as modificações no procedimento de entrada dos dados de demanda, de maneira a facilitar a comunicação entre o modelo BLUES e o modelo TEA.

O vetor de demanda no modelo BLUES é considerado como uma restrição de mínimo, ou seja, no mínimo aquele valor deve ser atingido pelo modelo para que o resultado da função de minimização de custos seja satisfeito. Um outro ponto a ser considerado são os *bdas*[3], que são as restrições de uso tecnológico no modelo, que podem ser superiores, inferiores ou fixas. Estes *bdas* funcionam como limitantes para a utilização de um certo

[3] *Bounds on activities.*

energético por uma indústria, ou como uma restrição de utilização mínima de um certo modal pelo setor de transporte em alguma região, sendo esta restrição utilizada para se chegar a soluções mais próximas da realidade, evitando soluções de canto.

Estes valores precisam ser reajustados sempre que há algum choque na demanda, ou seja, sempre que há um acréscimo ou uma redução na demanda, sempre é necessário haver o reajuste manual nas restrições do tipo *bda*, tornando o processo de implementação de cenários um procedimento de elevado custo homem-hora.

Assim, são apresentadas as alterações realizadas neste trabalho com a representação da demanda no modelo e na utilização dos *bdas*, facilitando choques de demanda e a aplicação de diferentes choques de demanda no modelo.

3.3.1 Demanda

Este trabalho tem como objetivo facilitar a troca de informações entre dois modelos existentes no laboratório Cenergia, o TEA e o BLUES. Como apresentado no relatório Opções de Mitigação [172], o antigo MESSAGE-Brazil 8000 trocava informações com o modelo otimizador de uso do solo da UFMG[4], o OTIMIZAGRO e o modelo de equilíbrio geral da USP[5], o EFES, como apresentado na Figura 3.4. Neste relatório, as demandas do modelo eram projetadas a partir de projeções de produção criadas pelo EFES e implementadas em modelos setorias [172].

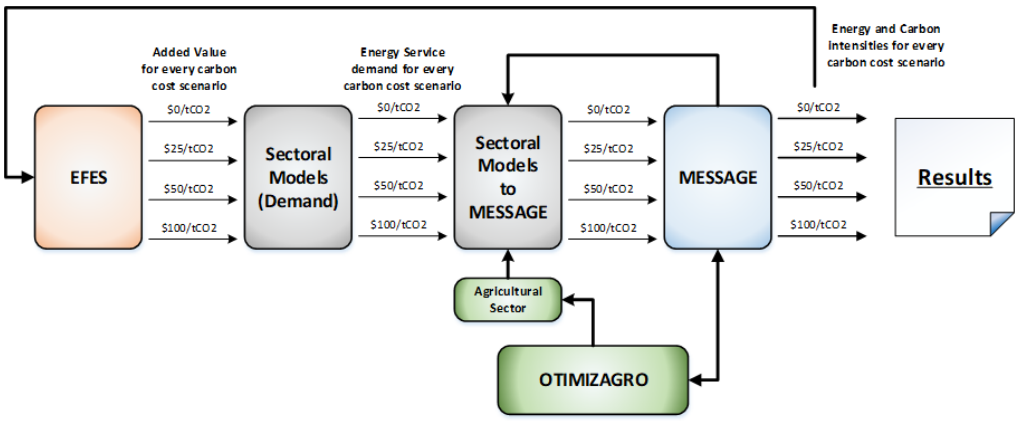


Figura 3.4: Modelagem setorial e modelagem integrada.
Fonte: MCTI [172]

Desta forma, eram necessários dois modelos externos ao laboratório para realizar esta modelagem integrada. No BLUES, a otimização de uso do solo ocorre de maneira

[4]Universidade Federal de Minas Gerais
[5]Universidade de São Paulo

endógena ao modelo e as demandas setoriais e energéticas são retiradas do modelo TEA [57, 82, 94], como apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5: Troca de informação entre os modelos TEA e BLUES
Fonte: Elaboração própria

Tanto no caso do relatório Opções de Mitigação como no relatório de Lucena *et al.*, a entrada da demanda no modelo foi realizada utilizando a proporção de valor adicionado aos setores e suas respectivas elasticidade-preço da demanda. Para facilitar a troca de informação entre os modelos são criadas tecnologias para conversão de demandas agregadas, como vapor, calor e eletricidade, em valor adicionado relativo. Isto faz com que os dados de saída do modelo TEA, em valor adicionado, possam ser utilizados diretamente pelo modelo BLUES, iniciando a integração entre os modelos.

A Figura 3.6 apresenta um exemplo do setor industrial para indicar como ocorre esta nova conversão no modelo, a partir da utilização de combustíveis por diferentes tecnologias para atender as demandas agregadas de vapor e calor e a passagem pela tecnologia de agregação das demandas em valores de demanda unitária.

Pode-se usar como exemplo uma demanda fictícia de 100 MWy de calor e 300 MWy de vapor no ano de 2010 e um aumento de 5% desta demanda para o ano de 2015. No modelo, estaria representado o vetor de demanda de calor: [100; 105] MWy e de vapor: [300; 315], com a criação da tecnologia de conversão de demanda agregada no modelo, este vetor de demanda seria: [1; 1,05] MWy caso estas demandas cresçam de forma proporcional, com a utilização da "*Dummy Demand Technology*", apresentada na Figura 3.6.

Deste modo, é facilitada a troca de informação entre os modelos para o caso do setor de transportes e industrial, porém isto ainda não é realidade para o setor de edificações, pois é necessário levar em conta questões de posse e renda, para o setor agrícola, pois os modelos contam com diferentes níveis de agregação de produtos e para o setor de resíduos, que ainda não está incorporado no TEA e impactos no consumo não afetam a produção de resíduos no BLUES.

Ao se analisar diversos cenários macroeconômicos como os SSPs, cada narrativa gera um novo vetor de demanda para o modelo, inclusive para o caso de cenários climáticos de emissões.

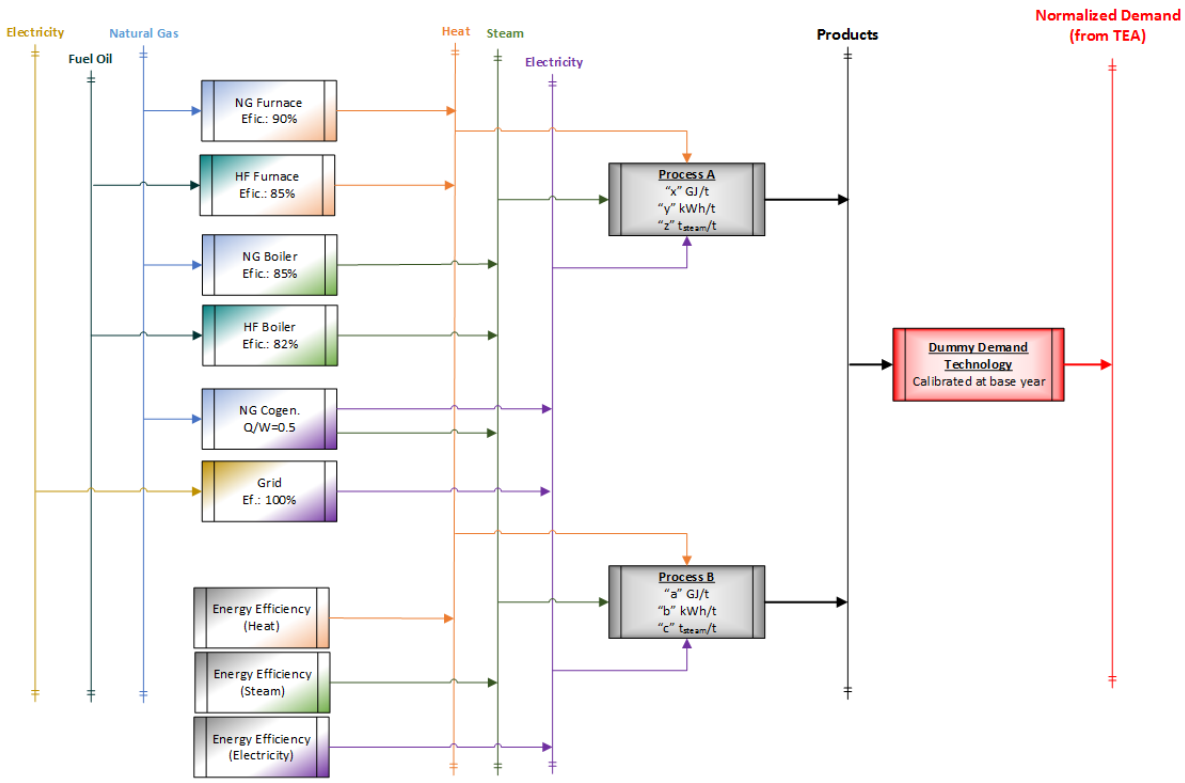


Figura 3.6: Conversão de demanda agregada para demanda normalizada
Fonte: Rochedo *et al.* [55] adaptado

3.3.2 Quota de participação de energéticos

Como no caso da demanda explicado na Subseção 3.3.1, no relatório Opções de Mitigação e no relatório de Lucena *et al.* fazia-se necessário alterar o limite superior e inferior de cada perfil de consumo energético em qualquer cenário que ocorresse alteração na demanda setorial, como é o caso dos SSPs. Isto acarretava em diversos modelos setoriais para recalcular o perfil de consumo energético em cada narrativa e com elevado esforço homem-hora, dado a maneira como ocorre a sua entrada no modelo com os *bdas*.

Esta limitação pode ser resolvida a partir do recurso de restrição do MESSAGE, que utiliza uma equação do tipo da Equação 3.2 e também uma equação de *share*, como a Equação 3.3.

$$R_1 = \alpha x_A + \beta x_B \tag{3.2}$$

$$f = \frac{x_A}{x_A + x_B} \tag{3.3}$$

Em que R_1 é o valor da restrição, α e β os coeficientes de cada tecnologia, x_A

representa a utilização de uma dada tecnologia[6] A qualquer, ou grupo de tecnologias, x_B representa todas as tecnologias não-A, f é o percentual de participação de dada tecnologia e o símbolo de igualdade pode ser representado por símbolos de maior que ou menor que, dependendo se é o limite superior ou inferior de tal fração.

Atribui-se ao coeficiente β o valor 1 e à R_1 o valor 0 como ponto de convergência da equação, deste modo pode ser utilizada a característica de maior que ou menor que na restrição. Com isso, $x_B = -\alpha x_A$ e da Equação 3.3, com um simples algebrismo, pode-se mostrar que $x_B = x_A \frac{1-f}{f}$, logo: $\alpha = \frac{f-1}{f}$, podendo ser utilizado na Equação 3.2 após a aplicação do valor de β e R_1. Para o modelo, haverá uma restrição de maior que ou menor que no valor de R_1.

Como exemplo, pode-se citar o *share* de utilização do gás natural para geração de calor em um setor industrial de 25%. Assim, tal tecnologia receberia o valor -3 em sua restrição, enquanto nas outras tecnologias de geração de calor desta indústria seria atribuída a mesma restrição, porém com o valor 1. O mesmo procedimento é aplicado para as medidas de mitigação, porém considerando a sua utilização conjunto em um limite superior e pode até ser usado como uma penetração mínima de uma certa tecnologia.

Elucidadas as alterações realizadas em comum para o setor industrial e de transportes, as próximas seções apresentam as modificações específicas de cada setor, antes de serem expostas as premissas dos cenários utilizados.

3.4 Modificações no setor industrial

Nesta seção são apresentadas as alterações específicas ao setor industrial do modelo, como a alteração na entrada da demanda e no perfil de consumo de energéticos.

3.4.1 Modificações na demanda

A demanda do setor industrial, como apresentado anteriormente, é gerada a partir de um vetor de demanda produzido pelo TEA, com a Tabela 3.2 indicando qual o agregado setorial da indústria no modelo TEA e qual o setor correspondente no BLUES que utiliza o seu crescimento.

Deste modo, é possível observar que o setor agregado I_S no TEA representa a indústria de ferro-gusa e aço no BLUES, bem como OFD para indústria de alimentos ou NMM para a indústria de minerais não-metálicos.

[6]Tecnologia é a terminologia do MESSAGE para qualquer transformação de uma forma de energia em outra, podendo ser utilizada para qualquer setor do modelo.

Tabela 3.2: Setor industrial agregado do TEA e setor correspondente do BLUES

Setor agregado do TEA e seu código no modelo	Setor industrial no BLUES
Indústria de Alimentos (exceto origem animal) - OFD	Alimentos e bebidas
Indústria Petroquímica - CRP	Química
Indústria Manufatureira - MAN	Papel e celulose
Indústria Manufatureira - MAN	Têxtil
Indústria Manufatureira - MAN	Outras
Indústria Siderúrgica - I_S	Ferro-gusa e aço
Indústria Siderúrgica - I_S	Ferroligas
Indústria Siderúrgica - I_S	Metalúrgica
Indústria Minerais Não-metálicos - NMM	Cimento
Indústria Minerais Não-metálicos - NMM	Cerâmica
Indústria Minerais Não-metálicos - NMM	Mineração

Fonte: Elaboração própria a partir de Cunha *et al.* [57]

É possível notar uma certa incompatibilidade entre os modelos, com diversas indústrias do BLUES utilizando o mesmo fator de crescimento gerado pelo TEA. Isto se dá pois o TEA é um modelo global e, como apresentado anteriormente, nem sempre é possível realizar uma desagregação completa dos setores em modelos que representam diversas regiões. Assim, nota-se que um melhor detalhamento industrial neste modelo macroeconômico traria benefícios para as análises realizadas no BLUES.

3.4.2 Modificações tecnológicas

Além das alterações apresentadas sobre a entrada da demanda no modelo, são realizadas modificações no perfil de consumo de energéticos, como alterações nos limites superiores e inferiores de utilização de energéticos.

O modelo utiliza lógica simplificada para a projeção de uso de energéticos pelos setores industriais: observa-se a série histórica de consumo destes energéticos para cada setor da indústria e é gerada, a partir disso, uma projeção histórica de uso equivalente. Ou seja, pouca liberdade é dada ao modelo e não é considerada a possível tendência de eletrificação do setor industrial, como visto em diferentes projeções mundiais [15, 202–204].

Esta projeção histórica se encontra como um limitante para a escolha dos energéticos em cada setor industrial, como visto no exemplo encontrado na Figura 3.7, em que o carvão e a biomassa podem ser escolhidos como combustível para atender à uma demanda de calor, e as linhas superiores e inferiores sendo o limite superior e inferior

respectivamente da quota que cada tecnologia pode atender esta demanda. Este exemplo se limita a mostrar somente estes dois vetores energéticos para não dificultar o seu entendimento visual.

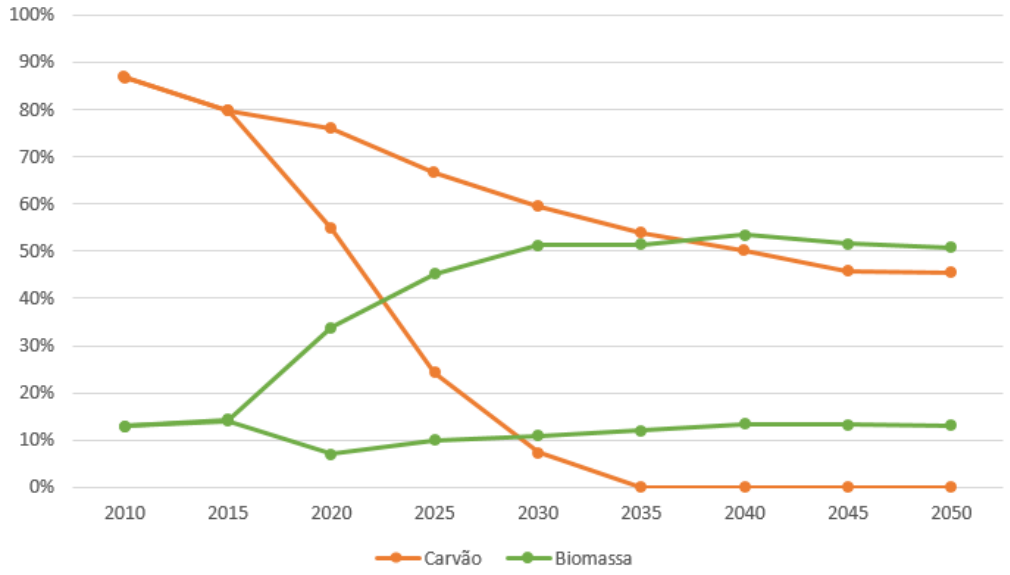


Figura 3.7: Limite superior e inferior da utilização de carvão e biomassa de uma indústria do BLUES

Fonte: Elaboração própria

Ainda é possível notar, nesta figura, que este setor poderia deixar de utilizar muito rapidamente os fornos a carvão e trocá-los por fornos a biomassa, indo de um limite inferior de utilização de aproximadamente 80% de carvão em 2015 para menos de 10% em 2030, se mostrando como uma mudança muito drástica para este setor. É então, com o intuito de tornar o modelo mais representativo da realidade, realizada uma modificação em todo o setor industrial, que é a retirada de parte deste aspecto de um cenário específico no modelo, alterando os limites superior e inferior das tecnologias existentes e suavizando a alteração dos setores, a partir da série histórica e da projeção histórica criada pelos relatórios de Opções de Mitigação [172, 205].

Além disso, em alguns setores da indústria o potencial de entrada das medidas de mitigação se somavam, o que não é necessariamente verdadeiro para alguns casos, pois certas medidas não são complementares às outras, mas sim substitutas, além de existir um elevado otimismo sobre a entrada destas medidas. Deste modo a Figura 3.8 é utilizada para ilustrar a mudança ocorrida no modelo, indicando a suavização da entrada das medidas de mitigação de uma indústria, como indicado pela linha cinza e que pode ser comparada com a curva superior, que indica a antiga entrada no modelo desta medida.

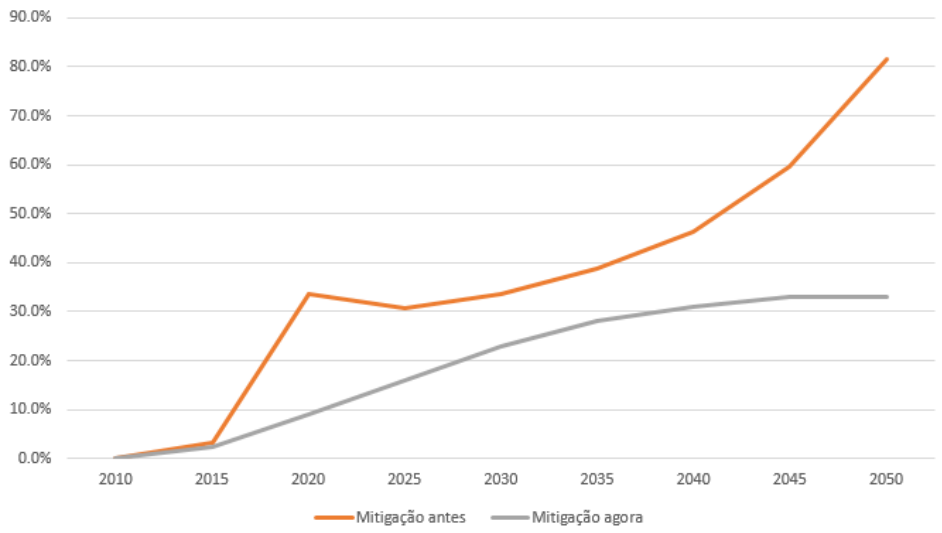


Figura 3.8: Comparativo entre o potencial máximo de medidas de mitigação em dado setor

Fonte: Elaboração própria

No caso do setor de ferro-gusa e aço o relatório considera um limite de projeção para da produção de aço a partir da tecnologia de arco elétrico em 26% no ano de 2050 [193], sendo que 22% da produção atual é realizada por este modo [206]. Seguindo a rota de possibilidade de expansão da indústria para sua eletrificação, é utilizado o valor médio de produção de aço a partir da rota de arco elétrico da União Europeia para o ano de 2017, de 40,3% [206], como *proxy* de projeção limite da produção brasileira em 2050, valor este não tão otimista quando se comparado à produção italiana ou estadunidense, de 80,3% e 68,4%, respectivamente [206]. Outra modificação neste setor é possibilitar a saída da rota de produção de ferro gusa por produtores independentes, pois esta era considerada quase constante até o ano de 2050.

Outro exemplo é o setor químico, que era fortemente limitado para realizar modificações nas fontes energéticas utilizadas para atender as suas demandas pela maneira como foi concebido no modelo. Então são utilizados os dados do relatório de Opções de Mitigação do setor químico para criar novas tecnologias no modelo e possibilitar mudanças de vetor energético dentro do setor [198]. São também atualizados os dados da rota de desidratação de etanol para produção de eteno, utilizando dados encontrados em Oliveira *et al.* [207].

Utilizando a metodologia descrita na Subseção 3.3.2, são criados modelos setoriais individuais para alterar a quota de participação de energéticos, alterando a utilização dos *bdas* existentes no modelo e implementando os *shares* de participação. É criado um modelo para cada setor da indústria existente no BLUES, totalizando 12 modelos setoriais, em que são testadas e ajustadas as quotas de participação. Com isso, estes modelos setoriais podem ser reintroduzidos no modelo e servem para facilitar a criação de análises com choques na demanda.

A partir disso, todas as restrições tecnológicas do setor industrial são refeitas, permitindo que alterações na demanda sejam automaticamente alinhadas com o perfil de consumo energético e facilitando modificações no comportamento deste perfil.

3.5 Modificações no setor de transportes

As narrativas dos SSPs foram criadas levando em conta diferenças regionais e no nível de desenvolvimento dos países, pois foram idealizadas para utilização em modelos globais de análise integrada. Estes modelos apresentam um nível de agregação muito superior aos modelos nacionais, pois seu intento é retratar a dinâmica das políticas climáticas de cada região, mas não há grande distinção entre os dados e as tecnologias por país ou região. Porém, há como extrapolar tais narrativas ao nível nacional, como visto em Absar e Preston [208]. Deste modo, é apresentada nesta seção como ocorre a desagregação do setor de transportes em um IAM nacional brasileiro, para a implementação das narrativas dos SSPs com diferenciação entre as tipologias de cidade.

3.5.1 Modificações na demanda

Para realizar a desagregação da demanda do modelo BLUES em tipologias de cidade, são utilizados os dados apresentados no Relatório Geral da ANTP [209] para desagregar a demanda do modelo em diferentes tipologias de cidade.

A metodologia de modelagem de demanda da ANTP foi criada a partir de pesquisas

domiciliares em cinco regiões metropolitanas e um município de porte médio para que pudessem, então, criar indicadores e suas correlações estatísticas a partir de características sociais, econômicas e demográficas, para que a extrapolação para outros municípios pudesse ser feita. Esta base de dados abrange 83 municípios e 30,9 milhões de habitantes.

A partir desta base de dados, foram calculadas as taxas de mobilidade por transporte, sendo considerados automóveis, motocicletas, transporte público, a pé ou a bicicleta, a partir de pesquisas Origem Destino. Para entender o comportamento de tais taxas de mobilidade, foram utilizados ainda dados secundários para encontrar possíveis correlações, como área, PIB e população municipal, índice IDH do município, total de veículos, PIB *per capita*, densidade urbana, veículos por habitante, entre outros. Com isso, foram criados métodos estatísticos e modelos de regressão para ajustar os valores encontrados [209].

O principal resultado do Relatório Geral da ANTP para este trabalho está indicado na Tabela 3.3 pois, a partir destes valores, é possível realizar a desagregação da demanda em diferentes tipologias de cidade. É importante enfatizar que a parcela referente à mobilidade não motorizada não é utilizada para esta desagregação, pois seria necessário criar um novo modelo *bottom-up* para gerar uma nova curva de demanda ao invés de utilizar a curva já criada com o Projeto Opções de Mitigação [201].

Tabela 3.3: Distâncias anuais percorridas pelas pessoas por modo de transporte e porte do município em 2016, por bilhões de km/ano

Modo		**Faixa de população** (habitantes)				
		Mais de 1 milhão	De 500 mil a 1 milhão	De 250 a 500 mil	De 100 a 250 mil	De 60 a 100 mil
Transporte coletivo	Ônibus (municipal + metropolitano)	81,4	21,9	30,2	34,2	13,8
	Trilhos	29,0	0,1	0,0	0,0	0,0
	Subtotal	110,4	22,0	30,2	34,2	13,8
Transporte individual	Auto	55,0	15,7	20,3	22,0	8,5
	Moto	6,1	3,4	4,1	5,2	2,8
	Subtotal	61,1	19,2	24,5	27,2	11,3
Transporte não motorizado	Bicicleta	1,0	0,8	1,5	2,3	1,7
	A pé	12,0	4,1	6,0	7,1	3,8
	Subtotal	13,0	4,9	7,4	9,4	5,5
Total		184,5	46,1	62,1	70,8	30,7

Fonte: Relatório Geral da ANTP [209]

Deste modo, este presente trabalho faz uso de dados apresentados no relatório da ANTP para realizar a desagregação do setor de transporte de passageiro. Em primeiro

lugar é necessário agrupar a população brasileira em níveis de densidade populacional de acordo com a desagregação realizada no relatório, como apresentado na Tabela 3.4 a partir de dados do IBGE[7].

Tabela 3.4: População brasileira por agregado de municípios, segundo tipologia utilizada pela ANTP

Densidade populacional	Quantidade de pessoas	Percentual total
Até 60 mil habitantes	72.180.913	34,3%
Entre 60 mil e 100 mil habitantes	17.265.307	8,2%
Entre 100 mil e 250 mil habitantes	31.616.692	15%
Entre 250 mil e 500 mil habitantes	22.571.643	10,7%
Entre 500 mil e 1 milhão de habitantes	20.429.467	9,7%
Acima de 1 milhão de habitantes	46.083.103	21,9%
Total	210.147.125	100%

Fonte: Adaptado a partir de dados do IBGE [210]

Os dados apresentados no Relatório Geral da ANTP demonstram uma pequena variação em diferentes características por porte de município entre os municípios de 100 mil a 1 milhão de habitantes como PIB *per capita* e mobilidade, distância percorrida e tempo de viagem por habitante e modo de transporte, possibilitando a agregação destes municípios [209]. São também agregados os municípios com até 60 mil habitantes e entre 60 mil e 100 mil habitantes, como visto na Tabela 3.5. Tais premissas são necessárias visto que o quão maior for a resolução da desagregação, mais tempo de processamento seria necessário para simular o modelo. Assim, tendo em vista que este é um modelo integrado e não um modelo setorial, tal preciosismo na resolução não traria ganhos significativos nas análises propostas.

Tabela 3.5: População brasileira por agregado de municípios

Densidade populacional	Tipologia	Quantidade de pessoas	Percentual total
Até 100 mil habitantes	P	89.446.220	42,6%
Entre 100 mil e 1 milhão de habitantes	M	74.617.802	35,5%
Acima de 1 milhão de habitantes	G	46.083.103	21,9%

Fonte: Adaptado a partir de dados do IBGE [210]

A Figura 3.9 apresenta quais cidades brasileiras se encaixam em cada agregado populacional, como descrito anteriormente.

[7]Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

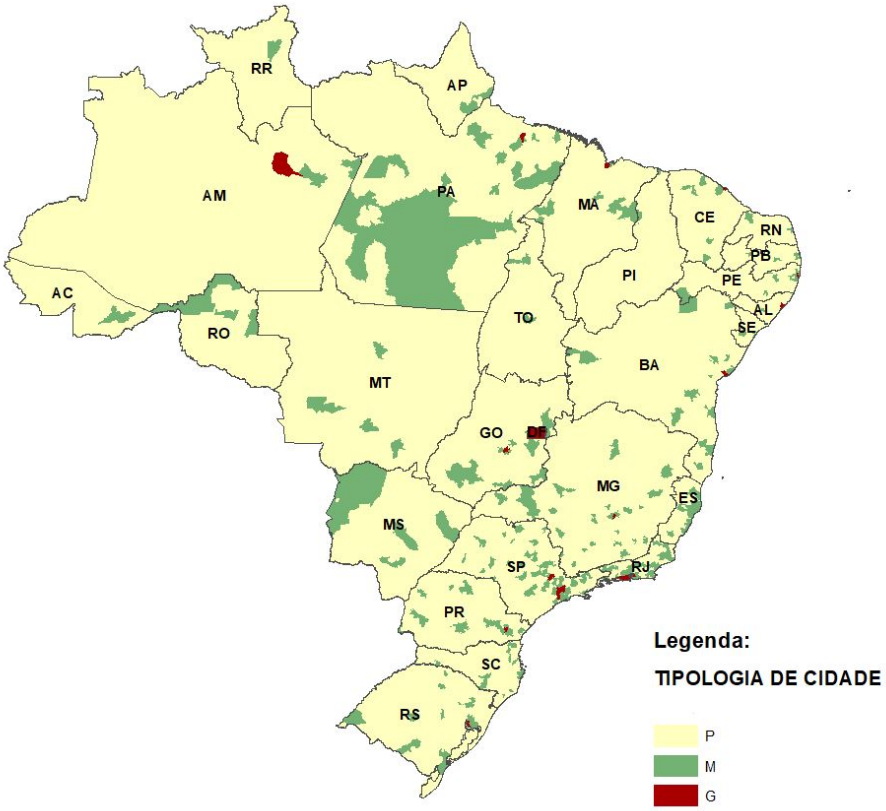


Figura 3.9: Representação das cidades brasileiras por agregado populacional
Fonte: Elaboração própria

Este novo agregado populacional por município é separado por Grande Região, da maneira como o Brasil está representado no BLUES, conforme apresentado na Tabela 3.6, sendo este o primeiro passo para desagregar a demanda do setor de transportes de passageiro.

Tabela 3.6: População brasileira por agregado de municípios separado em regiões, em milhões de habitantes

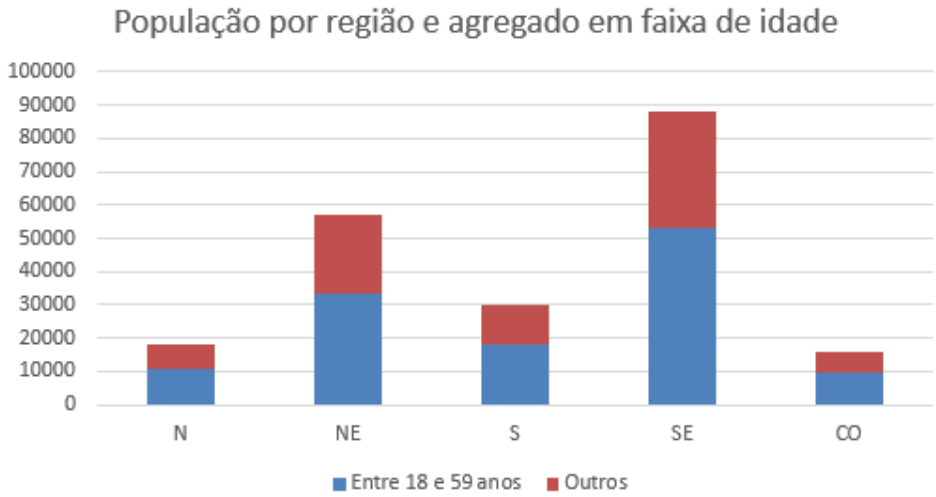
Densidade populacional	N	NE	CO	SE	S
Até 100 mil habitantes	8,9	33,4	6,4	25,6	15,1
Entre 100 mil e 1 milhão de habitantes	5,9	14,4	5,3	37,6	11,4
Acima de 1 milhão de habitantes	3,6	9,3	4,5	25,1	3,4
Total	18,4	57,1	16,2	88,3	29,9

Fonte: Adaptado a partir de dados do IBGE [210]

Outra premissa importante tomada para esta desagregação é a separação por idade, ao se considerar que a maior parcela da população que utiliza meios de transporte está

contida entre 18 e 59 anos. Deste modo a Figura 3.10 apresenta a relação relativa de população nesta faixa de idade em relação à população total por região.

Figura 3.10: População por região e agregado em faixa de idade



Fonte: SIDRA [211]

Desta maneira é possível desagregar a demanda das Grandes Regiões representadas no modelo em três diferentes tipologias de cidade: Grande, Média e Pequena, a partir da proporção da população por tipologia de cidade e sua parcela entre 18 e 59 anos.

Porém, para utilizar os valores de distâncias anuais percorridas é necessário separar a demanda do setor de transporte metroferroviário, que atualmente está contida na região Brasil do modelo, entre suas regiões. Deste modo são utilizados os dados do Anuário Metroferroviário de 2013/2014 da ANPTrilhos[8], com o número de passageiros transportados como *proxy* para esta desagregação regional, como visto de maneira agregada por Grande Região brasileira na Tabela 3.7.

Duas outras premissas análogas entre si se referem ao uso de comerciais leves e micro ônibus pelo setor de transportes de passageiros. O Relatório Geral da ANTP não considera a desagregação entre ônibus e micro ônibus ou entre carros e táxis e SUVs. Deste modo, é considerada a atual relação de uso entre tais veículos dentro do modelo e do Projeto Opções de Mitigação para calcular a participação deles na utilização de automóveis e ônibus, como observado no sudeste, com 12% da demanda de ônibus sendo atendida por micro ônibus e 16% da demanda de automóveis atendida por comerciais leves [201].

[8]Associação Nacional dos Transportadores de Passageiros sobre Trilhos

Tabela 3.7: Percentual do total de passageiros transportados por sistemas metroferroviários em 2013 por Grande Região

GR	Percentual de passageiros transportados
Norte	0
Nordeste	4,1
Centro-Oeste	1,6
Sudeste	92,3
Sul	2

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da ANTPTrilhos [212]

Com a divisão da demanda em tipologias de cidade e a apresentação das premissas anteriormente citadas, são então utilizados os dados do relatório geral da ANTP, indicados na Tabela 3.3, para criar uma nova separação entre o *share* de tipos de automóveis utilizados para atender a demanda de transporte de passageiro dos diferentes tipos de cidade nas regiões do modelo. Como exemplo e desconsiderando a parcela de não motorizados, na cidade pequena 55% de sua demanda é atingida pelo transporte de ônibus, 34% por automóveis e 11% por motocicletas. Isto indica que, como premissa, o *share* de transportes utilizado por cidades pequenas em uma região do modelo é o mesmo por todas as regiões, o mesmo se aplica às outras tipologias de cidade.

Tabela 3.8: Percentual das distâncias anuais percorridas pelas pessoas por modo de transporte e porte do município

Modo	Tipologia de cidade		
	G	M	P
Automóvel	38,6	37,1	33,9
Motocicleta	4,3	8,1	11,1
Ônibus	57,1	54,8	55

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Relatório Geral da ANTP [209]
Nota: G: Cidade grande; M: Cidade média; P: Cidade pequena.

Apresentada a divisão da demanda do setor de transportes de passageiro no modelo, a próxima seção apresenta as premissas e os dados para a atualização do custo e da eficiência energética dos diferentes veículos alternativos introduzidos no modelo, assim como as tecnologias complementares para o setor de transportes, como as tecnologias de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis e custo para infraestrutura necessária para sua utilização.

3.5.2 Modificações tecnológicas

Como apresentado no Projeto Opções de Mitigação para o setor de transportes [201], existem no modelo veículos a combustão interna, híbridos, elétricos e a hidrogênio para o transporte de passageiro e diferentes opções de caminhões a diesel para o transporte de carga. A curva de custo destas tecnologias no modelo não acompanhou a rápida queda de preço de equipamentos que os compõe, como motores elétricos e baterias [132, 141], demandando uma revisão em seus custos e ganhos de eficiência, da mesma maneira que diferentes opções tecnológicas começam a surgir para o setor, como veículos com reforma embarcada e caminhões elétricos.

Deste modo, são criadas curvas de preço e ganho de eficiência energética a partir do custo desagregado de equipamentos chave que compõe estes veículos.

Veículos alternativos

A partir das tecnologias apresentadas na Subseção 2.3.3 são criadas premissas para diferentes veículos existentes no modelo, como veículos leves de transporte de passageiro, caminhões de carga leve, média e pesada e ônibus.

São considerados 3 tipos de veículos para o modal de transporte rodoviário: o veículo elétrico a bateria (BEV), o veículo elétrico movido a pilha a combustível a hidrogênio (FCEV) e o veículo elétrico com reforma de combustível embarcada (LiqFCEV), sendo cada um destes tipos criados para o transporte de passageiros (LDV), para caminhões de carga leve (LDT), média (MDT) e pesada (HDT) e para ônibus.

Nas próximas tabelas são apresentadas as premissas de cada veículo, como sua massa em tonelada, a potência do motor, da pilha a combustível, a potência que o reformador deve entregar[9], a capacidade de armazenamento da bateria e o armazenamento de hidrogênio, para que seja possível criar, a partir dos custos extensivos por unidade de produto, as curvas de custo destes veículos.

Na Tabela 3.9 encontram-se valores retirados da literatura ou estimados para veículos leves. É assumida uma bateria de pequeno porte para os veículos à célula combustível [139], bem como é criada uma capacidade de reforma necessária para o veículo, necessária para atender a célula combustível do veículo com reforma embarcada.

A Tabela 3.10 expõe as premissas das massas e potências dos caminhões, pois tais valores são comuns aos caminhões e independem do combustível e da tecnologia utilizada, bem como as referências utilizadas.

[9]Este valor é estimado e serve somente para ilustrar que o reformador deve ter capacidade de produzir hidrogênio o suficiente para atender a pilha a combustível.

Tabela 3.9: Premissas do veículo leve

Premissas	BEV	FCEV	LiqFCEV	Ref.
Massa (t)	1,25	1,25	1,25	
Motor (kW)	80	80	80	[139]
Bateria (kWh)	30	1,3	1,3	[139, 213]
FC (kW)	0	80	80	[139]
Reformador (kW)	0	0	80	[214]
Armazenamento H_2 (kg)	0	6,5	0	[139]

Fonte: Elaboração própria a partir de dados referenciados na tabela
Nota: BEV: Veículo elétrico a bateria; FCEV: Veículo elétrico a pilha a combustível a hidrogênio; LiqFCEV: Veículo elétrico a pilha a combustível a etanol; FC: Pilha a combustível.

Tabela 3.10: Premissas da massa e potência necessárias para os caminhões

Premissas	LDT	MDT	HDT	Ref.
Massa (t)	4	7	14	
Motor (kW)	115	150	200	[215, 216]

Fonte: Elaboração própria a partir de dados referenciados na tabela
Nota: LDT: Caminhões leves; MDT: Caminhões médios; HDT: Caminhões pesados.

A Tabela 3.11 expõe as premissas gerais dos caminhões que variam de acordo com o combustível usado, e também a literatura de referência.

Tabela 3.11: Premissas gerais dos caminhões

Caminhão	LDT			MDT			HDT			
Premissa	BET	FCET	LiqFCET	BET	FCET	LiqFCET	BET	FCET	LiqFCET	Ref.
Bateria (kWh)	109	4	4	150	8	8	312	30	30	[215, 217]
FC (kW)	0	115	115	0	150	150	0	200	200	
Reformador	0	0	115	0	0	150	0	0	200	[214]
Armazenamento H_2 (kg)	0	8	0	0	10	0	0	18	0	Estimado de [215]

Fonte: Elaboração própria a partir de dados referenciados na tabela
Nota: BET: Caminhão elétrico a bateria; FCET: Caminhões elétricos a pilha a combustível a hidrogênio; LiqFCET: Caminhões elétricos a pilha a combustível a etanol; FC: Pilha a combustível.

A Tabela 3.12 apresenta as premissas dos ônibus e suas respectivas referências.

Tabela 3.12: Premissas do ônibus

Bus	BEB	FCEB	LiqFCEB	Ref.
Massa (t)	15	15	15	[151]
Motor (kW)	207	207	207	[151]
Bateria (kWh)	300	12	12	[218]
FC (kW)	0	207	207	
Reformador (kW)	0	0	207	
Armazenamento H2 (kg)	0	40	0	[150]

Fonte: Elaboração própria a partir de dados referenciados na tabela
Nota: BEB: Ônibus elétrico a bateria; FCEB: Ônibus elétrico a pilha a combustível a hidrogênio; LiqFCEB: Ônibus elétrico a pilha a combustível a etanol; FC: Pilha a combustível.

Para obtenção dos valores da tabela de custos finais, é necessário estimar e obter da literatura valores desagregados de cada veículo, como o custo por tonelada da estrutura do carro, do caminhão e do ônibus, por exemplo. Os valores de estrutura por tonelada são mostrados na Tabela 3.13 e são mantidos constantes, de maneira conservadora, até 2050. Tais valores são obtidos a partir de dados sobre o custo da estrutura do veículo e divididos pela massa da estrutura.

Tabela 3.13: Valor extensivo das estruturas

Veículo	Valor (US$/t)	Ref.
Carro	18.480	[139]
Caminhão	6.972	[219]
Ônibus	25.667	[150]

Fonte: Elaboração própria a partir de dados referenciados na tabela

Na Tabela 3.14 estão apresentados os valores do motor elétrico (em US$/kW), da bateria (em US$/kWh), da pilha a combustível (em US$/kW de conversão), do reformador e do armazenamento de hidrogênio (em US$/kWh), bem como a evolução de custo em 2015, 2030 e 2050. As referências apresentadas são referentes a valores encontrados na literatura, em sua maioria com o custo em dólar e a grandeza apresentada em kW, kWh ou kg, e são apresentados de forma extensiva, como US$/kW e US$/kWh. Tais premissas podem ser consideradas otimistas, porém são escolhidas através de relatórios e trabalhos de análises setoriais e membros da indústria [131, 214, 220]. Os valores desta tabela variam de acordo com o cenário SSP analisado, conforme conforme apresentado na Seção 3.6.2.

Tabela 3.14: Valor extensivo dos componentes

Componentes	2015	2030	2050	Ref.
Motor elétrico (US$/kW)	23	20	18	[139]
Bateria (US$/kWh)	400	150	100	[131, 221]
Célula combustível (US$/kW)	380	54	40	[139]
Reformador	3020	2881	2685	[214]
Armazenamento H_2 (US$/kWh)	23	14	12	[139, 220]

Fonte: Elaboração própria a partir de dados referenciados na tabela

A partir dos dados apresentados nas tabelas anteriores é possível criar a tabela de custo final, que é utilizada como input direto para os custos de investimento destas tecnologias no BLUES. Estes valores podem ser encontrados na Tabela 3.15. A curva de aprendizado para caminhões aparenta ser mais acentuada do que a dos veículos leves, porém o que ocorre é que os caminhões precisam de uma capacidade superior de baterias, motores elétricos e reformadores ao se comparar com os veículos leves, o que eleva a diferença entre eles, mas não necessariamente a sua razão.

Tabela 3.15: Tabela de custo final para veículos terrestres, em US$

		2010	2020	2030	2040	2050
Veículos leves	BE	43.500	31.282	29.200	28.277	27.500
	FC	63.404	43.840	32.245	31.318	30.491
	LiqFC	61.043	42.511	32.096	31.246	30.515
Caminhões leves	BE	95.094	51.620	44.364	41.239	38.641
	FC	83.825	55.094	38.568	37.218	36.019
	LiqFC	81.599	54.118	39.008	37.727	36.628
Caminhões médios	BE	142.791	82.945	72.964	68.669	65.101
	FC	124.558	86.059	64.415	62.591	60.977
	LiqFC	122.036	85.092	65.202	63.456	61.959
Caminhões pesados	BE	290.570	166.409	145.800	136.994	129.700
	FC	213.415	153.671	122.624	119.526	116.809
	LiqFC	206.175	149.279	121.503	118.644	116.212
Ônibus	BE	573.434	453.981	434.140	425.654	418.623
	FC	513.610	455.875	420.706	417.401	414.436
	LiqFC	488.202	436.997	409.513	407.087	405.009

Fonte: Elaboração própria

Nota: BE: Veículo elétrico a bateria; FC: Veículo elétrico a pilha a combustível a hidrogênio; LiqFCEB: Veículo elétrico a pilha a combustível a etanol.

Para o cálculo da eficiência energética, são apresentados os valores na notação mais

apresentada na literatura, como consumo específico: kWh/100km para veículos elétricos e kgH_2/100km para os veículos a célula combustível. Para os veículos com reforma embarcada é utilizada a mesma notação dos veículos a pilha combustível a hidrogênio, pois é dada a partir da conversão de etanol em hidrogênio.

Como premissa, o aumento de eficiência no consumo específico dos tipos de veículos, elétrico, à célula combustível e com reforma embarcada, ocorre de maneira análoga para os diferentes transportes devido à falta de dados encontrados na literatura, logo, a razão do aumento de eficiência existente nos veículos leves é incorporada nos caminhões e ônibus.

Para os carros elétricos, o seu consumo específico pode reduzir de 18 kWh/100km em 2015 (como visto em Lutsey e Nicholas [140]) para 12,5 kWh/100km em 2030 e 10 kWh/100km em 2050. Essa redução é associada à ganhos de eficiência na conversão do motor e redução de peso do chassi, possíveis ganhos gerados por mudança da tecnologia de armazenamento ou até pelo aumento da densidade energética das baterias.

O consumo específico do veículo a pilha a combustível a hidrogênio começa em 0,94 kgH_2/100km em 2015 (como visto em Wainwright e Peters [222]) para 0,73 kgH_2/100km em 2030 e 0,56 kgH_2/100km em 2050. Este ganho de eficiência de aproximadamente 60% de 2015 para 2050 ocorre pela possibilidade da célula combustível atingir o seu limite teórico de conversão elétrica. Este limite possivelmente não pode ser alcançado, mas o aumento de eficiência leva em conta possíveis mudanças na tecnologia de célula combustível utilizada, aumento da capacidade de armazenamento de hidrogênio em veículos ou melhoria nos motores.

O consumo específico dos veículos com reforma embarcada segue o consumo dos veículos a célula combustível, porém com um acréscimo decorrente da conversão do combustível em hidrogênio. Esta conversão tem uma eficiência de 85% em 2015 e é estipulado um aumento para 90% em 2050 [144].

A Tabela 3.16 mostra, de maneira resumida, a evolução no tempo do consumo específico dos veículos terrestre atualizados no modelo, sendo o consumo específico dos veículos elétricos dado em kWh/100km e dos veículos a pilha a combustível em kgH2/100km.

Para sua utilização no modelo, estes valores são convertidos para a unidade de veículo quilômetro por quilowatt ano ($V.km/kW_{ano}$) utilizando dados de poder calorífico inferior dos combustíveis.

Tabela 3.16: Consumo específico dos veículos

		2015	2030	2050
Veículos leves	BE	18	13	10
	FC	0,94	0,73	0,56
	LiqFC	1,10	0,83	0,63
Caminhões leves	BE	100	69	55
	FC	11,14	8,63	6,68
	LiqFC	13,01	9,87	7,43
Caminhões médios	BE	115	80	64
	FC	12,67	9,82	7,60
	LiqFC	14,80	11,23	8,45
Caminhões pesados	BE	130	90	72
	FC	16,80	13,01	10,08
	LiqFC	19,63	14,89	11,20
Ônibus	BE	135	94	75
	FC	10,00	7,75	6,00
	LiqFC	11,68	8,86	6,67

Fonte: Elaboração própria

Nota: BE: Veículo elétrico a bateria; FC: Veículo elétrico a pilha a combustível a hidrogênio; LiqFCEB: Veículo elétrico a pilha a combustível a etanol.

Tecnologias complementares para o setor de transportes

O hidrogênio já é comumente usado na indústria química, na produção de ureia e amônia, e no setor de óleo e gás, onde é usado no hidrotratamento e hidrocraqueamento de refinarias. Este gás tem o potencial de se tornar um vetor importante para a descarbonização de diversos setores, como o setor industrial e o de transportes [220, 223, 224]. Para isso, faz-se necessária a adição de novas tecnologias produtoras deste vetor energético no modelo além das já existentes no setor químico e de óleo e gás, como as rotas bioenergéticas com e sem captura de carbono e a eletrólise a partir de fontes renováveis, além de considerar um custo para a instalação de sua infraestrutura.

Para implementação destas tecnologias no modelo são necessários dados como consumo energético, eficiência de conversão da planta, custo de investimento, tempo de construção, custo fixo e variável, capacidade de plantas já instaladas e o consumo de água, quando existir. Deste modo, esses valores são retirados de diferentes fontes e servem como base para a criação destas rotas no modelo [225–228].

Além da produção de hidrogênio, deve ser considerado o custo para a implementação da infraestrutura necessária para a distribuição deste gás, da mesma forma que precisa ser levado em conta o custo para os postos de abastecimento. Para isso, são utilizados os

dados da calculadora do Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL[10]) sobre estimativa de custo desta infraestrutura [229].

Apresentadas as modificações realizadas neste trabalho, no Apêndice B são mostrados os números das alterações realizadas no modelo. Na próxima seção são apresentadas as premissas dos cenários avaliados.

[10]National Renewable Energy Laboratory

3.6 Estudo de caso dos SSPs

O estudo de Lucena *et al.* analisou o contexto de segurança nacional em diversos fatores [82]. Deste modo, tal estudo foi a primeira tentativa de avaliar os *Shared Socioeconomic Pathways* em um modelo de análise integrada. Porém certas premissas são passíveis de revisão, em face da curva de aprendizado tecnológica, como a penetração de veículos puramente elétricos no setor de transportes brasileiro e não havia sido implementada a desagregação em tipologias de cidade para este setor.

Porém, diferentemente do relatório de Lucena *et al.* em que o foco era trabalhar a segurança hídrica, energética e alimentar, neste trabalho as premissas não pertencentes ao setor industrial e de transportes para os cenários dos SSPs são apresentadas de forma mais direta, pois são retiradas do relatório [82], apresentados na Tabela 3.17 e explicados em sequência. Já as premissas dos setores aqui estudados, estão separadas por setor e apresentadas com suas diferenças entre demanda, perfis de consumo e específicas de tecnologias. Também é analisado o cenário SSP2, que não havia sido estudado no relatório.

Deste modo, a Figura 3.11 apresenta os cenários analisados, sendo que os cenários "SSPx"representam as narrativas com ausência de limite de emissão e os cenários "SSPx_2C"compostos pelo limite de emissões compatíveis com o aumento da temperatura inferior a dois graus acima da temperatura média pré-industrial, em 2100. Os valores entre parênteses e abaixo dos cenários de 2 graus representam qual é o limite de emissão atribuído ao Brasil nestes cenários e são um resultado do modelo TEA [82].

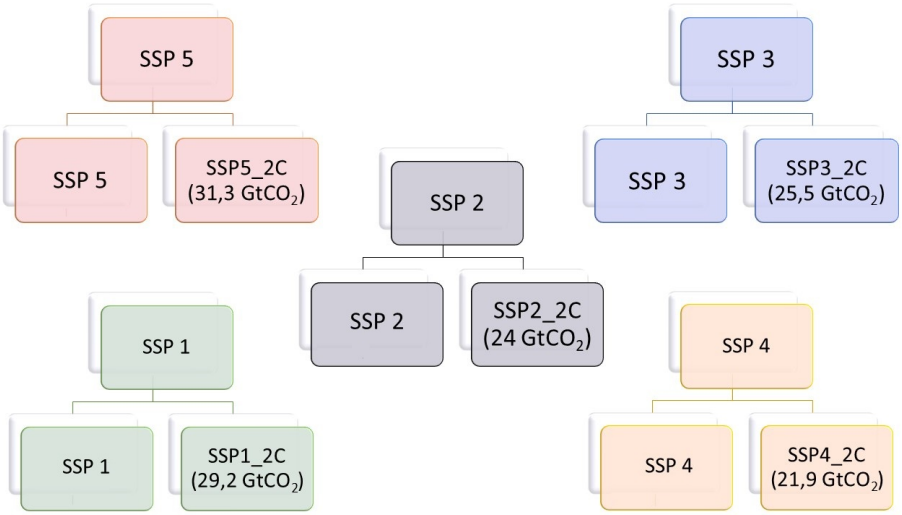


Figura 3.11: Cenários utilizados para o estudo de caso
Fonte: Elaboração própria

Para calcular o nível de emissão alocado ao Brasil no cenário de restrição de emissões dos SSPs, o modelo TEA, que é um modelo global, roda tais cenários para todas as regiões do mundo e dele é retirado o orçamento de carbono brasileiro. Este orçamento está apresentado na Figura 3.11, porém deve-se atentar ao fato de que o orçamento do cenário restritivo em emissões do SSP2 foi retirado do trabalho de Rochedo *et al.* [55].

Outro dado importante e retirado do modelo TEA é a projeção do PIB brasileiro por cenário. Tal crescimento afeta diretamente a projeção da demanda e, consequentemente, os dados de entrada do modelo BLUES. Deste modo, a Figura 3.12 apresenta o o crescimento econômico dos cenários analisados, em bilhões de dólares, com a linha preenchida representando os cenários sem limite de emissão e a linha tracejada representando os cenários com o orçamento de GEE.

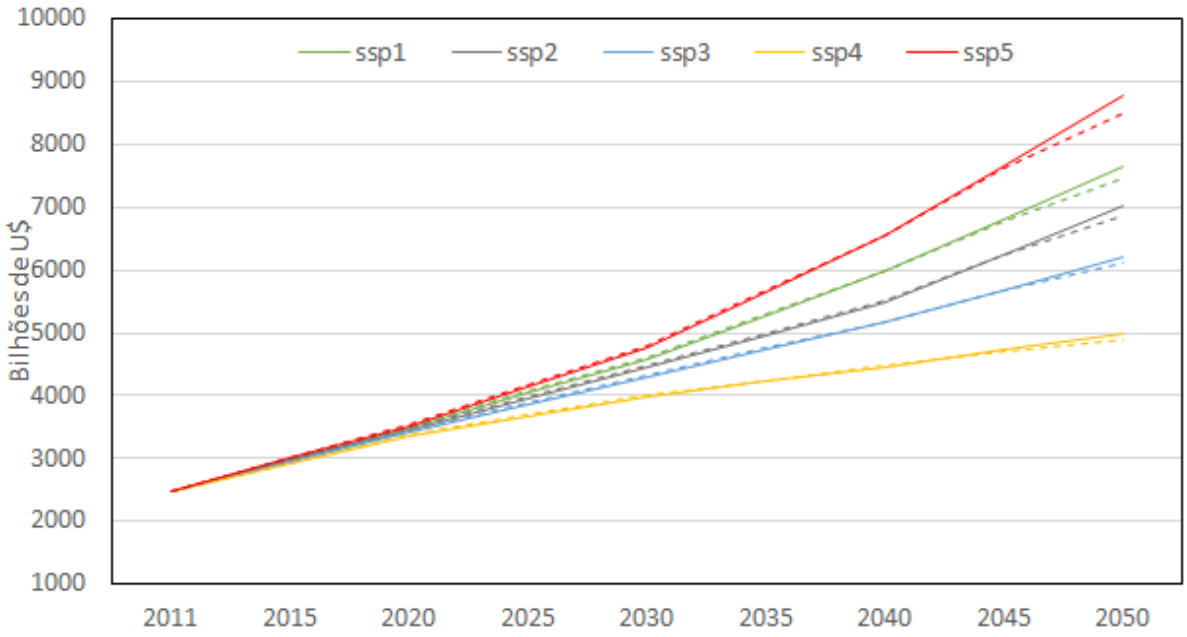


Figura 3.12: Projeções macroeconômicas advindas modelo TEA sobre o PIB brasileiro, em bilhões de dólares

Fonte: Lucena *et al.* adaptado [82]

É notória a diferença de crescimento macroeconômico do cenário sem restrição para o com restrição e isto se dá pela redução no crescimento devido aos custos de mitigação em tais cenários. A partir do uso contínuo de recursos fósseis, o SSP5 representa uma narrativa de alto desenvolvimento econômico, que se difere do SSP1 em uso de recursos, onde neste cenário são mais bem empregados e em que ocorre um crescimento que não muito se difere do SSP5.

Apresentado um resultado macroeconômico importante e a diferenciação entre os cenários de base e climáticos, a Tabela 3.17 expõe os parâmetros simulados por cenários proposto do relatório de Lucena *et al.* , em que não há diferenciação entre tais premissas dos cenários de base e climáticos. A seguir são descritos os parâmetros apresentados nesta tabela. É importante frisar que o relatório de Lucena *et al.* não fez considerações sobre o cenário SSP2, devido a sua proximidade com um cenário *business as usual* e a existência de diversos outros trabalhos que o utilizam.

Tabela 3.17: Parâmetros simulados por cenário proposto

Parâmetro	Descrição da Representação no Modelo	Cenários			
		SSP1	SSP3	SSP4	SSP5
Restrição ao uso de recursos fósseis	Precificação de carbono em fósseis	20 USD/tCO2	Zero	Zero	Zero
Incentivo à produção de biocombustíveis	Mandato de biocombustíveis (Diesel e QAV)	B15 e BQ10	B10 e BQ5	B10 e BQ5	B0 e BQ0
Incentivo à expansão de fontes renováveis	Curva de aprendizado (*learning rate*)	25%	15%	25%	10%
	Limite à penetração de fontes intermitentes	40%	30%	40%	20%
Eletrificação de veículos rodoviários leves	Penetração mínima a partir de 2030 (% de vendas)	10%	Zero	5%	Zero
Tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS)	Limite superior à penetração de carbodutos (variação %)	Zero	-50%	Zero	50%
Mudança no perfil de consumo (comportamental)	Redução média de consumo (% a.a.)	0,5%	Zero	Zero	Zero
Ganhos de eficiência energética autônoma (AEEI)	Autonomous Energy Efficiency Improvements - AEEI (% a.a.)	1,0%	0,5%	1,0%.	1,5%
Restrições na disponibilidade hídrica	Percentual de Q_{95}	50%	90%	70%	50%
Acesso à água (urbano)	Abastecimento e tratamento de efluentes domésticos em 2050				
- Abastecimento	Percentual de abastecimento	99%	90%	90%	95%
- Tratamento de efluentes domésticos	Percentual do tratamento de efluente doméstico	99%	30%	30%	99%
- Perdas na distribuição	Percentual de perdas	10%	50%	50%	10%
Eficiência no uso de água	Variação média da demanda de água (%a.a.)	1,1%	-0.30%	0,6%	1,1%
Abertura de áreas de vegetação nativa (desmatamento)	Cenários Rochedo et al. (2018)	Zero	IEG	SEG	IEG
Produção agropecuária sustentável	Produção de orgânicos (% produção em 2050)	10%	Zero	5%	Zero
Dieta mais rica em carnes	Preferência mundial dos consumidores em 2050 (variação %)	-50%	Zero	Zero	25%

Fonte: Lucena *et al.* [82]

Sobre os parâmetros que se referem à segurança energética, a restrição à disponibilidade de recursos fósseis se resume aos desafios apresentados a investimentos em infraestrutura na cadeia de produção de óleo e gás, como na expansão da produção em novos campos de petróleo, utilização do gás natural associado ou no aumento da capacidade de refino brasileiro. É restrita, então, a disponibilidade de recursos das bacias brasileiras e a capacidade futura de produção, refino e importação de derivados. Para o SSP1, é também criada uma curva de crescimento para a precificação de carbono [82].

Para o incentivo à produção de biocombustíveis, utiliza-se a política nacional de biocombustíveis como justificativa, sendo o RenovaBio a política mais recente. Neste caso, são utilizados diferentes mandatos de biocombustíveis por cenário, como apresentado na Tabela 3.17.

O incentivo à expansão de fontes renováveis se dá por meio de limites à penetração destas fontes no Sistema Interligado Nacional e pela redução de custo destas tecnologias, a partir de curvas de aprendizado. No modelo, há uma restrição que limita a utilização de fontes intermitentes, desta maneira é dada ao modelo a liberdade de atingir ou não um novo patamar superior de utilização destas fontes, não sendo esta uma imposição.

Quanto à eletrificação de veículos rodoviários leves mostrada na Tabela 3.17, outras premissas precisam ser utilizadas neste trabalho, causadas pela desagregação da demanda do setor de transportes em tipologias de cidades. Já o uso de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) e tecnologias de captura e armazenamento de carbono a partir de fontes agrícolas (BioCCS), são simulados os parâmetros como apresentados no relatório, seguindo as narrativas apresentadas em Fujimori *et al.* [45], Vaughan *et al.* [230] e Daigneault *et al.* [231].

As mudanças no perfil de consumo e os ganhos com eficiência autônoma (AEEI) são reduções diretas na demanda de energia dos diversos setores representados no modelo, como transportes e edificações, e não são diretamente implementados no BLUES. Tais reduções na demanda saem como resultado direto do modelo TEA e são utilizadas como dados de entrada no BLUES. Por sua vez, o BLUES tem opções de eficiência, como na indústria, que também sofrerão variações conforme as narrativas, sendo apresentados a seguir.

Quanto aos parâmetros sobre segurança hídrica, a restrição da disponibilidade hídrica mediante a outorga do uso dos recursos hídricos trata da garantia de que esse recurso escasso e finito esteja disponível para a utilização entre todos os usuários de acordo com seus múltiplos usos [232]. Dessa maneira a restrição desta disponibilidade de água para os usuários consuntivos se dá como uma fração da vazão máxima de outorgável de

Q_{95}[11] por bacia hidrográfica [82]. Logo é imposto um limite na quantidade máxima de água que pode ser retirada de um corpo hídrico de modo a possibilitar a preservação da biodiversidade aquática e terrestre da bacia hidrográfica [233].

O acesso ao abastecimento urbano de água se dá pelo direito do ser humano em consumir esse recurso natural, sendo esse um uso prioritário das águas das bacias hidrográficas [232]. Contudo, devido as grandes perdas existentes no processo de transporte dessa água do ponto de tratamento até o consumidor final, tem sido observadas taxas de captação muito superiores as necessárias para o abastecimento humano o que tem gerado danos para a sustentabilidade e conservação de mananciais subterrâneos. Esse fenômeno também tem sido agravado devido as baixas taxas de tratamento de efluentes domésticos urbanos [234]. Desse modo as narrativas dos SSPs buscam que o acesso ao abastecimento urbano se relacione com variações de percentuais de taxas de abastecimento urbano, tratamento de efluentes domésticos e perdas na distribuição de maneira regionalizada [82].

Além disso, a eficiência no uso de água se dá pela implementação de medidas restritivas pelo governo brasileiro por cenário, aumentando o uso eficiente do recurso hídrico. Tais aumentos podem ocorrer por mudanças comportamentais, tecnológicas ou técnicas de reuso de água que acabam gerando diminuições de demanda de água e consequentemente diminui a pressão sobre os corpos hídricos e aumenta a segurança hídrica da região [82]. Isto foi feito através da alteração dos coeficientes exógenos de consumo de água, conforme os dados da Tabela 3.17.

Para os parâmetros de segurança alimentar, são implementadas restrições a partir de medidas e instrumentos de políticas com base nas diretrizes básicas da Política Nacional de Segurança Alimentar, considerando o Nexo Energia-Água-Alimento. Tais medidas são aplicadas pela ótica de oferta e demanda de alimentos condizentes com cada linha narrativa.

A abertura de áreas de floresta nativa/desflorestamento é um parâmetro considerado mesmo contando com apenas uma relação indireta com a segurança alimentar, como o que ocorre com a proteção de áreas de floresta nativa, podendo acarretar em menos impactos sobre a biodiversidade local e acaba por preservar o equilíbrio ecológico regional. De acordo com a WHO[12] [235], é fundamental manter um alto nível de biodiversidade para a conservação da produção e da produtividade dos principais cultivos chave da alimentação mundial [82]. Para isso, são considerados dois dos cenários apresentados em

[11] Este valor representa a vazão mínima observada na série histórica do corpo hídrico durante, pelo menos, 95% do tempo.

[12] World Health Organization

Rochedo *et al.* [55], sendo o IEG (*Intermediate environmental governance*) o cenário que representa a manutenção das políticas correntes de controle ambiental, de acordo com os tratados e leis ambientais, como o Código Florestal, e o SEG (*Strong environmental governance*), que representa a expansão das atuais políticas de comando e controle, em conjunto com tratados e incentivos de conservação florestal. Neste caso, os cenários de base seguem as modificações de uso do solo conforme o trabalho de Rochedo *et al.*, enquanto os cenários com restrição de emissão são norteados por tais modificações até o ano de 2030.

O segundo parâmetro sobre a segurança alimentar considerado é sobre a produção agropecuária sustentável, que tem como objetivo a menor utilização de insumos químicos na produção de produtos agropecuários, reduzindo possíveis impactos, como a redução no número de insetos polinizadores e impactos causados à saúde humada por consequência da ingestão de produtos tratados com estes agrotóxicos.

Pela ótica da demanda alimentar, é considerada uma modificação na alimentação populacional, de modo que esta pode ser modificada em uma dieta mais rica em carnes ou em frutas e vegetais, levando em conta o perfil alimentar mais ou menos saudável. Tal modificação é realizada no TEA e é melhor apresentada na tese de Cunha [2].

Apresentadas as premissas referentes ao relatório, nas próximas seções são expostas as premissas referentes aos setores do modelo que sofreram alterações neste trabalho e, por isso, precisam ser detalhados de forma individual.

3.6.1 Indústria

Para a construção dos parâmetros da indústria, são utilizados diversos artigos presentes na literatura sobre o setor industrial e os SSPs, como Fujimori *et al.* [45], Kriegler *et al.* [236] e Wang *et al.* [237] e artigos que tratam de setores específicos na indústria, como em Zhang *et al.* [238] com a indústria de cimento.

A Tabela 3.18 resume, de maneira qualitativa, alguns dos parâmetros que se alteram na indústria, suas descrições e como se comportam por narrativa.

A eletrificação na indústria refere-se à velocidade na qual algum setor industrial pode vir a eletrificar-se, ou seja, alterar sua preferência de consumo energético atual para o consumo de eletricidade em processos em que isso se faz possível. Isto significa que setores como o de ferro-gusa e aço podem atingir patamares internacionais de eletrificação, como a produção média de aço por arco elétrico da União Europeia [206] ou valores inferiores, como o valor médio de produção da América do Sul, ou na indústria química, como visto em Schiffer e Manthiram [204]. Deve-se ainda citar que não há homogeneidade

de eletrificação dentro do setor industrial como um todo, pois para criação de alguns produtos, como a cerâmica vermelha da indústria de cerâmica, dificilmente ocorrerá uma significativa mudança de energético no processo.

Tabela 3.18: Parâmetros do setor de industrial por cenário

Parâmetro	Descrição	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Eletrificação na indústria	Preferência ou velocidade de eletrificação	Alta	Média	Média	Alta	Baixa
Tendência de perfil de consumo energético	Gás	Aumenta	Mantém	Aumenta	Mantém	Aumenta muito
	Líquidos	Reduz	Mantém	Aumenta	Mantém	Aumenta
	Carvão	Reduz muito	Mantém	Aumenta	Mantém	Aumenta
	Biomassa	Aumenta	Mantém	Mantém	Mantém	Mantém
Medidas de mitigação na indústria	Deslocamentos temporais para o alcance do limite superior	Mais rápido	Padrão	Muito mais lento	Mais lento	Padrão

Fonte: Elaboração própria

A tendência de perfil de consumo energético indica que, além da eletrificação, cada setor industrial poderá tender para o uso de algum combustível específico. Neste quesito são diferenciados os 4 principais energéticos utilizados pela indústria brasileira: gás natural, combustíveis líquidos derivados de petróleo, carvão e biomassa [172]. Como apresentado em Fais *et al.* [239], a indústria tem um potencial não aproveitado para redução de gases de efeito estufa e a modificação no uso de energéticos dos seus diversos setores pode auxiliar a alcançar patamares ainda maiores de redução em cenários restritivos.

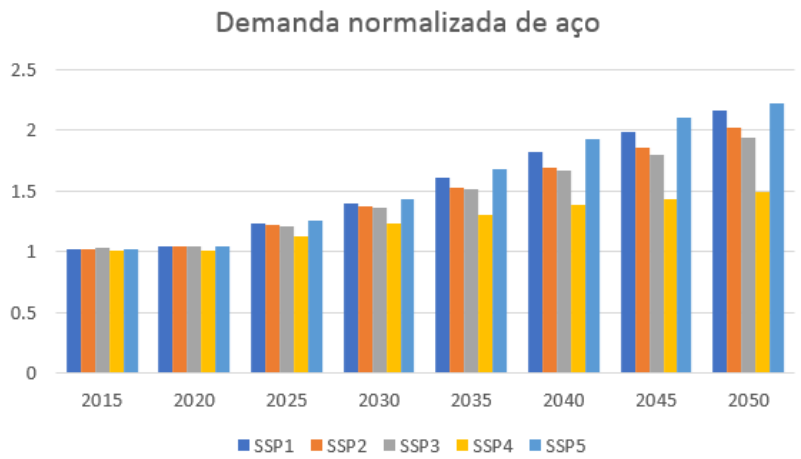
As medidas de mitigação na indústria são como apresentadas nos relatórios Opções de mitigação [172], com os diferentes setores industriais apresentando suas respectivas melhores tecnologias disponíveis (MTD), ou seja, tecnologias capazes de mitigar emissões de GEE, de maneira direta ou indireta. São consideradas tecnologias capazes de realizar recuperação de calor, diferentes processos para o mesmo produto, sistemas de cogeração, entre outras. É, então, considerado o potencial máximo de mitigação por melhora tecnológica para cada setor industrial brasileiro e o tempo de entrada para tais tecnologias.

Demanda

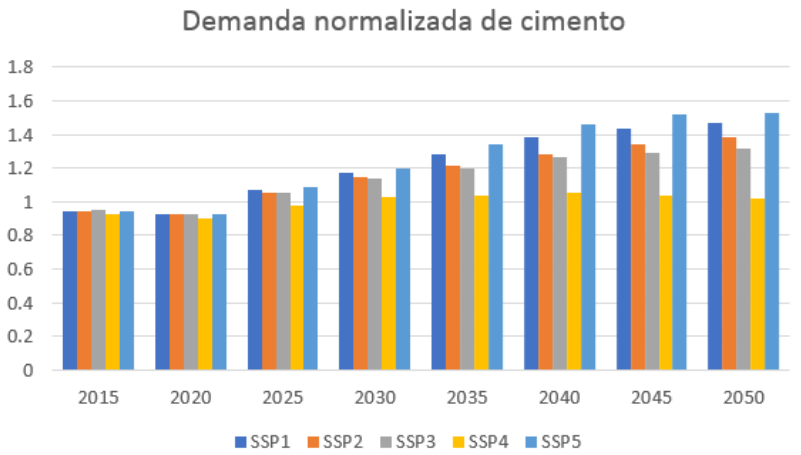
A demanda do setor industrial, como apresentado na Subseção 3.4.1, é gerada a partir de um vetor de demanda produzido no modelo TEA. Deste modo, a Figura 3.13 apresenta a demanda relativa ao ano base de aço (Figura 3.13a) e de cimento (Figura 3.13b) por cenário SSP. Tais demandas servem para ilustrar as diferenças entre os cenários e

que o crescimento de cada indústria se dá de maneira diferenciada por narrativa. É importante citar que as demandas das indústrias variam também entre os cenários com e sem restrição de emissões e que estes resultados do modelo TEA são apresentados apenas de maneira ilustrativa.

Figura 3.13: Demandas relativas ao ano base, por cenário



(a) Demanda de aço



(b) Demanda de cimento

Fonte: Elaboração própria

Perfil de consumo

Como indicado anteriormente, os parâmetros de eletrificação na indústria e tendência de perfil de consumo energético ditam as projeções para o perfil de consumo em cada narrativa dos SSPs.

A alta eletrificação na indústria significa que indústrias como a de ferro-gusa e aço, ferroligas, química, mineração, entre outras, tendem a atingir maiores patamares de eletrificação, que ocorre de maneira mais rápida do que poderia ocorrer no cenário de base, diferentemente da média, que representa não se alterar de maneira significativa e da baixa, que seria uma redução no potencial máximo de utilização de eletricidade pela indústria e um atraso para alcançar este potencial máximo.

Além da eletrificação, algumas indústrias são possibilitadas a atingir patamares superiores para o uso de diferentes energéticos, como o aumento no uso de coque de petróleo e óleo combustível pela indústria de cimento, ou o aumento pela preferência da indústria de ferro-gusa e aço por carvão, permitindo a diferentes indústrias alcançarem patamares passados de *shares* de combustíveis, dependendo do cenário, porém levando em conta as especificidades de cada indústria [205]. Estes valores seguem as tendências mostradas por Kriegler *et al.* [236] e Fujimori *et al.* [45] em seus materiais suplementares. Um exemplo a ser comentado é a entrada do carvão como fonte de energia da indústria no SSP5, pois o modelo tem seu horizonte de análise no ano de 2050 e, segundo este cenário, o carvão teria um novo crescimento após este ano.

A Tabela 3.19 apresenta, de maneira quantitativa, como algumas indústrias podem se comportar nos diferentes cenários dos SSPs, com a variação no tempo para atingir o limite superior e o quão maior este limite pode ser, considerando o ano de 2050.

Tabela 3.19: Valores quantitativos para mudanças de perfil na indústria

Parâmetro	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Eletrificação	-10 anos/+20%	NA/0%	NA/-5%	-5 anos/+10%	+10 anos/-10%
Gás	+10%	0%	+10%	0%	+20%
Líquidos	-10%	0%	+10%	0%	+10%
Carvão	-25%	0%	+5%	0%	+10%
Biomassa	+10%	0%	0%	0%	0%

Fonte: Elaboração própria
Nota: NA: Não alterado.

Tecnologias

Como medidas tecnológicas, são consideradas as medidas de mitigação na indústria. Para cada cenário são consideradas diferentes deslocamentos temporais para se atingir a utilização máxima possível destas medidas. Dado que o potencial de tais medidas é determinado por sua natureza e aplicação, como apresentado nos relatórios de Opções

de Mitigação para a indústria [172], seu potencial relativo não pode ser alterado. São, porém, consideradas alterações na taxa de penetração destas medidas que podem se alterar em conjunto com o crescimento econômico, então modificando o seu potencial absoluto.

Para este caso, são utilizadas as premissas das narrativas, como o mundo do SSP3 e do SSP4 sendo mais dividido, dificultando a entrada destas MTDs, e o caso contra intuitivo do SSP5 que, por ser uma rota muito tecnológica, não se altera o tempo para a possibilidade de atingir o limite máximo de utilização por estas medidas de mitigação, mesmo sendo um dos cenários com mais desafios para mitigação.

Tabela 3.20: Valores quantitativos para a possibilidade de atingir o limite superior de utilização de MTDs, em anos

Parâmetro	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Deslocamento temporal (anos)	-10	0	+15	+5	0

Fonte: Elaboração própria

CCS

Para o caso da utilização de captura de carbono pela indústria, somente a indústria química, de cimento e siderúrgica tem esta possibilidade no modelo. Neste caso, são consideradas as narrativas dos SSPs para alterar o ano de entrada destas tecnologias, como visto na Tabela 3.21.

Tabela 3.21: Valores quantitativos para a utilização de CCS pela indústria, em anos

Parâmetro	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Deslocamento temporal (anos)	+5	0	+10	0	-5

Fonte: Elaboração própria.

3.6.2 Transporte

Os parâmetros do setor de transportes são construídos com o auxílio de diferentes artigos presentes na literatura, como o trabalho de Bauer *et al.* [91], Fujimori *et al.* [45], a documentação do modelo WITCH [240] e artigos que tratam de aspectos mais específicas, como o aumento no compartilhamento de veículos Mittal *et al.* [241] ou como em de Andrade *et al.* [242], em que são considerados diferentes mandatos de biocombustíveis para os cenários SSPs no Brasil e levar em conta cenários para diferentes curvas de aprendizado de baterias, de maneira vista em Edelenbosch *et al.* [213].

Tabela 3.22: Parâmetros do setor de transportes por cenário

Parâmetro	Descrição	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Composição modal	Tendência de mudança	Alta	Mantém	Baixa	Heterogênea	Alta
Entrada de veículos alternativos	Elétrico	Homogênea	Heterogênea	Heterogênea	Heterogênea	Homogênea
	Pilha combustível	Homogênea	Heterogênea	Heterogênea	Heterogênea	Homogênea
Curva de aprendizado	Bateria	Alta	Média	Baixa	Alta	Baixa
	Pilha a combustível	Média	Média	Baixa	Média	Alta
Não motorização	Tendência de utilização	Alta	Intermediária	Baixa	Intermediária	Baixa
Emissão veicular	Controle de poluição	Forte	Médio	Baixo	Baixo	Forte
Compartilhamento de veículos	Fator de ocupação	Intensifica	Mantém	Reduz	Heterogênea	Reduz

Fonte: Elaboração própria

A tendência de composição modal refere-se ao quão expressiva se dará a modificação do uso dos diferentes meios de transporte nas regiões brasileiras. Isto significa que a transporte de passageiros nas cidades pode tender a se modificar, como a mudança do transporte individual, carro e motocicleta, para o transporte coletivo, ônibus e trens. Para isso, são usadas tendências internacionais como a tendência japonesa pelo transporte metroferroviário, como apresentado por Lipscy e Schipper [243], ou por ônibus, como em Hansson *et al.* [244]. A heterogeneidade neste parâmetro indica que ocorrem diferentes tendências para cada tipologia de cidade, não sendo um parâmetro que se altere em todas as cidades da mesma maneira.

A entrada de veículos alternativos foca na existência ou não existência de homogeneidade na penetração de veículos elétricos ou a pilha a combustível nas diferentes tipologias de cidade, como visto no relatório Opções de Mitigação, que indica que a entrada de novos carros no Brasil se dá com um atraso temporal dos outros países que os fabricam [201]. Assim, tal parâmetro é utilizado como um deslocamento temporal para a venda e utilização dos veículos elétricos e a pilha a combustível, para este caso

são também considerados os veículos de reforma embarcada a etanol.

A curva de aprendizado se refere, em sua maioria, aos componentes utilizados pelos veículos apresentados na Subseção 3.5.2, fazendo uso de diferentes cenários para variação de preço dos seus principais componentes: bateria e pilha a combustível. Deste modo, são usados cenários como os de Edelenbosch *et al.* [213] sobre as possíveis reduções no custo das baterias até 2050 e cenários como os da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* - IEA) [139, 220] e Thompson *et al.* [149], que indicam redução no custo da pilha a combustível. Em ambos os casos não é diretamente considerada a troca, no futuro, entre as tecnologias atualmente existentes de bateria ou pilha a combustível como preferenciais, como no caso de baterias de íons de lítio ou baterias de sal fundido[13] e pilhas de membrana ou cerâmicas[14], mas sim o comportamento da redução de custo como um todo. Estes custos afetam da mesma maneira os veículos do transporte de carga.

A tendência de não motorização é a indicação de que parte da demanda do setor de transporte de passageiro poderá se dar a pé, a bicicleta ou a partir de outros transportes não motorizados. A utilização de meios não motorizados é presente em diversas regiões do mundo [245–249] e pode ser considerada, no modelo, como uma redução da demanda total de transporte de passageiros, sendo diferenciada por tipologia de cidade. O transporte não motorizado é apresentado pela metodologia da ANTP [209] mas não foi considerado ao se criar a demanda do setor de transporte de passageiro no modelo. É então utilizado desta metodologia a proporção de utilização de não motorizados por tipologia de cidade para esta heterogeneidade.

O controle de emissão de GEE é representado na literatura sobre as narrativas dos SSPs, como em Riahi *et al.* [250], Fujimori *et al.* [45], Rao *et al.* [90] e Kriegler *et al.* [236]. Estes trabalhos apresentam como cada SSP tende à restrição de emissão local e global. Isto, ao se somar com a atual disposição de diferentes cidades com a limitação na entrada de veículos poluentes em seu perímetro [251–253], indica como se dará o controle de emissão veicular para cada cenário no modelo, sendo que este controle ocorre de forma predominante nas cidades grandes, ao se forçar a entrada de veículos com menor fator de emissão por quilômetro. Isto ocorre de maneira semelhante ao transporte de cargas, limitando as tecnologias mais emissoras.

Para o parâmetro de compartilhamento de veículos, são utilizados dados como os vistos em Riahi *et al.* [250], Mittal *et al.* [241] Zhang *et al.* [254], que indicam uma maior aceitação na partilha de veículos individuais como tendência, podendo ser causada

[13]Como as baterias ZEBRA, de Na-$NiCl_2$.
[14]Como as de óxido sólido.

pela maior conscientização ambiental e na utilização de aplicativos de compartilhamento para algumas narrativas ou uma redução neste fator para outras, seja devido a confiança em tecnologias para resolver os problemas causados pelas mudanças climáticas ou pela expansão urbana [250]. A heterogeneidade, neste caso, ocorre pela maior densidade demográfica das cidades grandes, que possibilita um maior compartilhamento, e a redução desta intensificação nas cidades pequenas.

Demanda

Assim como no caso do setor industrial, a demanda dos cenários SSPs é gerada pelo TEA no vetor OwnTc e utilizada pelo BLUES a partir da elasticidade-preço da demanda. Uma limitação entre esta troca de informações é que o TEA é um modelo global e o Brasil é representado como uma única região no modelo. Com isso, a demanda gerada pelo TEA é uma única demanda nacional, assim impossibilitando uma melhor utilização da metodologia de desagregação de demanda por tipologia de cidade apresentada neste trabalho.

A Figura 3.14 apresenta a demanda total do setor de transporte de passageiro, isto é, não separado por região e modal, normalizada com o ano base.

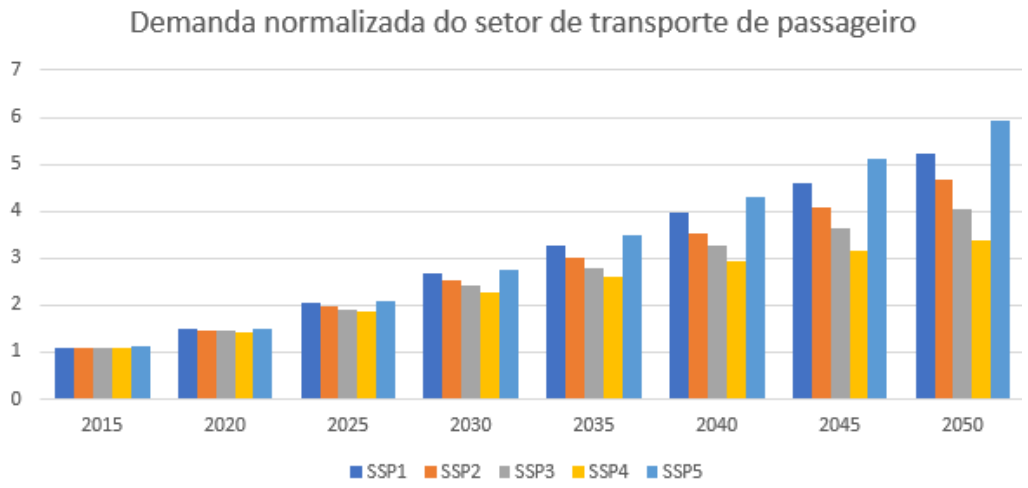


Figura 3.14: Demandas relativas ao ano base do setor de transporte de passageiro, por cenário

Fonte: Elaboração própria

O setor de transporte de carga tem o vetor de demanda OTP criado pelo TEA e a mesma metodologia do setor de transporte de passageiro para o cálculo da demanda no BLUES. De maneira análoga ao transporte de passageiros, o TEA projeta a demanda

do transporte de carga de maneira nacionalizada e faz-se necessário desagregá-la para as regiões do BLUES.

A demanda do total deste setor, relativa ao ano base, é mostrada na Figura 3.15.

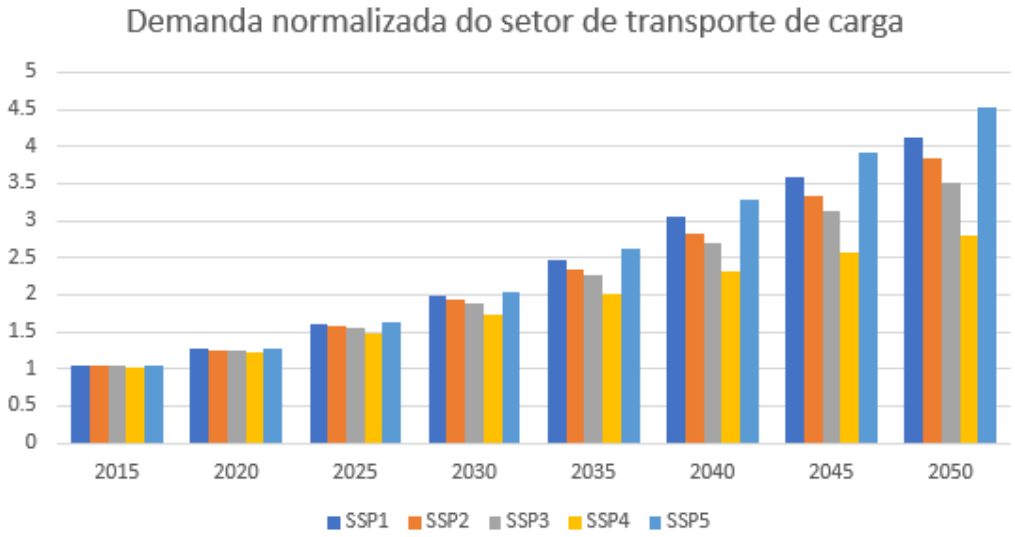


Figura 3.15: Demandas relativas ao ano base do setor de transporte de carga, por cenário

Fonte: Elaboração própria

Perfil de consumo

O parâmetro de composição modal representa a disposição de aceitação para uma modificação no transporte preferencial de deslocamento, ou seja, a inclinação para deixar de usar o transporte individual (TI) pelo coletivo (TM) ou vice versa. Tal critério é considerado como um aumento no limite superior para que esta preferência possa vir a ser utilizada e a heterogeneidade do cenário SSP4 se dá com a predileção pelo transporte coletivo na cidade grande e pelo transporte individual na pequena, por levar em conta a densidade populacional de cada tipologia de cidade.

A tendência de não motorização é considerada como uma redução adicional na demanda do setor de transportes de passageiro, dado que não é necessário um vetor energético para utilizá-la. Esta redução ocorre além dos efeitos macroeconômicos apresentados nos cenários. Os valores indicados são do potencial máximo para a utilização de não motorizados.

A intensificação do fator de ocupação indica a quais valores cada cenário considera para o número médio de pessoas por veículo individual no ano de 2050, sendo a modifi-

cação da ocupação atual até este novo valor realizada de forma linear pelos períodos do modelo.

A Tabela 3.23 resume os valores quantitativos referentes ao perfil de consumo do setor de transportes.

Tabela 3.23: Valores quantitativos para a alteração de perfil de consumo pelo setor de transportes

Parâmetro	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Composição modal	TI: -30% TC: +15%	0%	TI: +5% TC: -5%	TI: G: -10% P: +10% TC: G: +10% P: -10%	TI: + 20% TC: -15%
Não motorizado	5%	3%	1%	3%	2%
Fator de ocupação (pessoa/veículo)	2	1,5	1,4	G: 1,7 M: 1,4 P: 1,3	1,2

Fonte: Elaboração própria

Nota: TI: Transporte individual; TC: Transporte coletivo; P: Cidade pequena; M: Cidade média; G: Cidade grande.

Tecnologias

A entrada de veículos alternativos se dá pelo deslocamento temporal da entrada destes veículos por tipologia de cidade a partir das narrativas dos cenários, como a entrada em 2020 de veículos elétricos (BE) e em 2025 de veículos a hidrogênio (FCE) de maneira homogênea no cenários SSP1, porém com menor preferência pela utilização de veículos híbridos (HE) e com reforma embarcada (LiqFC), ou como no SSP2 com a entrada em 2020 para veículos com reforma embarcada em cidades médias e grandes, mas com atraso para cidades pequenas e entrada em 2025 para veículos elétricos e em 2030 com pilha a combustível na cidade grande, por existir maior preferência por esta tipologia de cidade na construção da infraestrutura necessária para estes veículos e posteriormente para as cidades médias e pequenas. No SSP3 ocorre a preferência por veículos híbridos, levando em conta a infraestrutura para fabricação destes veículos existente no país [143, 255], e com reforma embarcada, considerando os estudos realizados em universidades brasileiras com fabricante japonesa [256, 257], dado que a narrativa deste cenário se dá pela forte desconfiança e rompimento internacional, mostrando a necessidade de fabricação própria

destas tecnologias no país. Neste cenário estas tecnologias entram em 2020 nas cidades grandes e com atraso nas cidades médias e pequenas. No SSP4, a entrada se dará de forma parecida como no SSP2, mas com maior diferença de tempo entre as tipologias de cidade. Como no SSP5 ocorre uma maior confiança que o avanço tecnológico resolverá os problemas das mudanças climáticas, veículos elétricos e a hidrogênio não serão preferência tecnológica. Este cenário tem preferência por veículos com maior avanço tecnológico, como híbridos e reforma embarcada, sendo que estes entram de forma homogênea nas tipologias de cidade. Conforme apresentado na Tabela 3.24, em ano de entrada.

Tabela 3.24: Ano inicial de entrada por tecnologia por tipologia de cidade

Parâmetro	SSP1			SSP2			SSP3			SSP4			SSP5		
	P	M	G	P	M	G	P	M	G	P	M	G	P	M	G
BE		2020		2040	2030	2025	2040	2035	2025	2045	2030	2025		2030	
HE				2030	2025	2020	2025	2025	2020	2035	2030	2020		2020	
FCE		2025		2045	2040	2030	2045	2040	2035	2050	2040	2030		2035	
LiqFC		2020		2025	2020	2020	2025	2025	2020	2030	2025	2020		2020	

Fonte: Elaboração própria

Nota:P: Cidade pequena; M: Cidade média; G: Cidade grande.

De modo semelhante ao apresentado para o transporte de passageiros, os veículos alternativos para o transporte de carga têm sua entrada modificada por cenário, de acordo com as narrativas dos SSPs, como uma tendência ao início das vendas de caminhões elétricos e a hidrogênio no SSP1 ou aos caminhões a reforma embarcada no SSP5, com seus respectivos anos ocorrendo de maneira semelhante à apresentada anteriormente.

A redução no custo da bateria e da pilha a combustível se dá a partir dos cenários de Edelenbosch *et al.* e os cenários da IEA. Deste modo, são apresentados os valores finais, em 2050, por kWh de baterias e os valores por kW da pilha a combustível, utilizando uma regressão linear para a redução nos custos até este ano. Para os preços das baterias, é utilizado o cenário Líderes de mercado para o SSP2, Referência para o SSP3 e SSP5, Líderes de mercado otimista para o SSP4 e Custo inferior otimista para o SSP1 [213]. No caso da pilha a combustível, são usados os cenários de preço da Agência Internacional de Energia, sendo o parâmetro “alta"de curva de aprendizado traduzido no menor custo de pilha e o inverso para o parâmetro “baixa".

Para o critério de emissão veicular, é utilizada a tendência global de limite de emissão em cidades grandes e a redução no uso de veículos com alto fator de emissão, tanto para o transporte de passageiros como para o de carga. Para os cenários com forte controle de poluição, há uma maior restrição na entrada de veículos com fator de emissão elevado nas cidades grandes a partir de 2030, como carros, motos e ônibus a combustão interna, e maior restrição na venda de caminhões com motor de combustão interna menos eficientes,

representada por redução nas vendas dos mesmos. Para os cenários de médio controle, ocorre a mesma restrição em cidades grandes, porém deslocado para 2040 e uma restrição mais branda na venda de caminhões com motores menos eficientes. Nos cenários de baixo controle, nenhuma restrição se aplica. Deve-se atentar que não há ainda a contabilização de poluentes locais no modelo, sendo esta restrição aplicada sobre o uso dos veículos menos eficientes, impedindo a utilizando destes veículos.

A Tabela 3.25 expõe os valores acima apresentados de maneira resumida.

Tabela 3.25: Valores quantitativos para a alteração de perfil de consumo pelo setor de transportes, no ano de 2050

Parâmetro	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Custo de bateria (US$/kWh)	50	150	219	100	219
Custo da pilha a combustível ($/kW)	50	50	75	50	45
Ano de restrição por poluentes	2030	2040	SR	SR	2030

Fonte: Elaboração própria
Nota: SR: Sem restrição.

CCS

Para o caso de captura de carbono, esta não ocorre de maneira direta para o setor de transportes. De maneira indireta, há a possibilidade de utilização de combustíveis fósseis para a produção de hidrogênio com captura de carbono [179, 258, 259]. É considerada a variação no ano de entrada de tais tecnologias, por narrativa, como apresentado na Tabela 3.26.

Tabela 3.26: Valores quantitativos para a utilização de CCS na produção de hidrogênio, em anos

Parâmetro	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Deslocamento temporal (anos)	0	0	+15	0	-10

Fonte: Elaboração própria

Apresentado o modelo utilizado para a realização deste trabalho, suas alterações e modificações, os cenários utilizados e suas premissas e limitações, na próxima seção são descritos e analisados os resultados retirados do modelo.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo são expostos os resultados decorrentes de cada cenário desenvolvido neste trabalho, conforme a metodologia e os cenários descritos nos capítulos anteriores. Estes cenários são apenas uma aplicação prática da metodologia desenvolvida por este trabalho, utilizando alguns resultados no modelo TEA no modelo BLUES.

A avaliação destes cenários ocorre de forma conjunta, possibilitando a comparação entre eles, sendo este o objetivo deste trabalho. Os aspectos individuais de cada cenário são tratados, porém sem haver uma seção específica para cada.

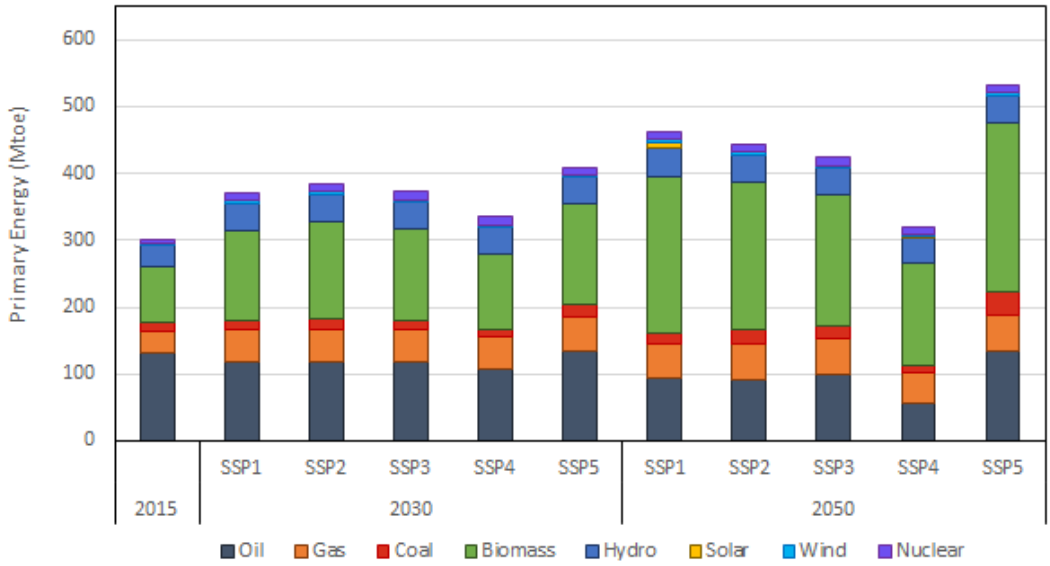
4.1 Resultados dos cenários

Nesta seção são apresentados os resultados retirados do modelo e baseados nas premissas indicadas no capítulo anterior. Assim, são apresentados resultados, por cenário, como energia primária, geração de energia elétrica, divisão de uso modal, entre outros. São exibidos os resultados dos SSPs, que são divididos entre seus cenários base e cenários com restrição de emissão, e comparados entre si, conforme suas modificações de uso de energia, suas modificações de uso do solo, seus níveis de emissão e nos setores modificados neste trabalho.

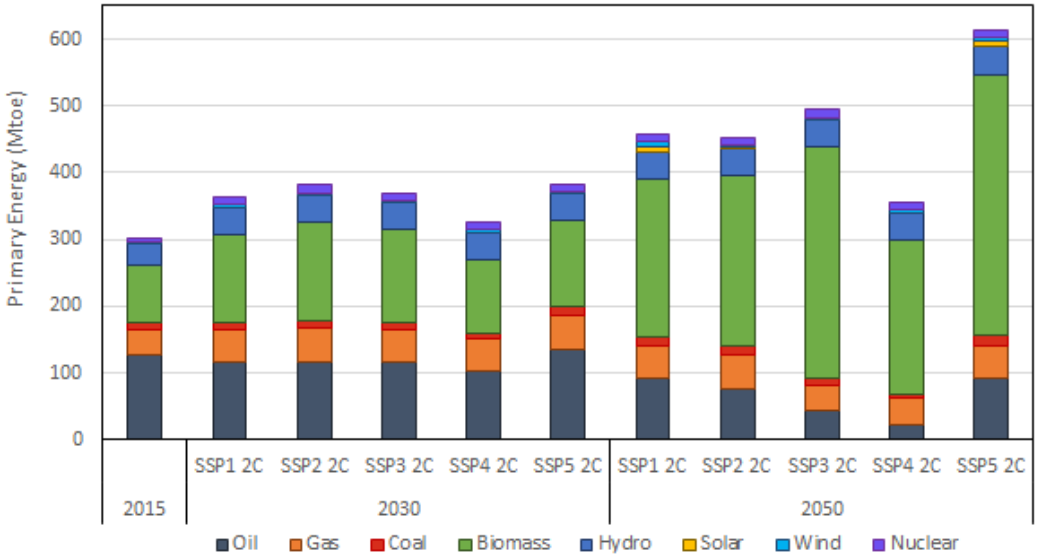
4.1.1 Energia primária

A energia primária é um importante indicador do consumo de energia no país. A sua composição indica variações no uso das principais fontes de energia, além de estar associado a aspectos macroeconômicos, como o crescimento econômico; eficiência energética, perfil tecnológico, etc. Deste modo, a Figura 4.1 apresenta o consumo brasileiro

de energia primária por cenário no ano de 2015, 2030 e 2050, com o intuito de expôr suas possíveis alterações no longo prazo e o ano de 2015 é exibido de forma comparativa.



(a) Cenários base



(b) Cenários com restrição de emissão

Figura 4.1: Energia primária (Mtoe) em 2030 e 2050 para os cenários analisados

Fonte: Elaboração própria

Os cenários SSP1 e SSP5 base, apresentados na Figura 4.1a, se mostram com o maior consumo energético no ano de 2050, que se dá como consequência direta do seu

crescimento econômico. Para o ano de 2030, há relativamente menor diferença entre o consumo de energia nos SSP1, SSP2 e SSP3, sendo somente o SSP4 o de menor consumo energético e que está de acordo com o crescimento econômico. Isso destaca também que, no curto prazo, os efeitos entre cenários é pequeno. No longo prazo, no entanto, o crescimento econômico e o perfil tecnológico diferentes são mais evidentes e levam a resultados divergentes, exaltando as diferenças entre os cenários.

Para os cenários de base, somente no SSP1 se apresenta uma entrada significativa de energia primária solar e eólica, o que era esperado, devido a redução na restrição de entrada de fontes intermitentes e reduções de custos mais agressivas de fontes renováveis modernas. O SSP5 conta com uma relativa maior entrada de óleo e carvão ao compará-lo com os outros cenários por ter uma narrativa que favorece a entrada de combustíveis fósseis, sendo o único cenário a apresentar aumento no uso de petróleo até 2030.

Já nos cenários de restrição de emissão, nota-se um grande aumento no uso de biomassa na maioria dos cenários com exceção do SSP1, dada pela necessidade de utilização de BioCCS de alguns cenários para atingir a restrição de emissão e, com isso, ocorre o efeito secundário de aumento no consumo de energia primário causado pela menor eficiência de conversão das tecnologias que fazem uso da biomassa. Este efeito somente não é observado no SSP1 por ser o cenário com menor diferença no consumo de biomassa entre o caso base e restritivo, no ano de 2050.

Em 2030 o SSP5 é o cenário com menor participação de renováveis, ao se comparar com a média entre os cenários, fato que se dá pelo maior uso de carvão e outros fósseis. Porém, tal narrativa passa a ser a com maior utilização de fontes não fósseis no cenário de restrição em 2050, que se dá pela necessidade de alta mitigação das emissões.

Há uma pequena diferenciação entre os cenários com e sem restrição de emissão no ano de 2030, sendo a modificação mais relevante no uso de carvão como fonte de energia primária e uma leve redução no uso de óleo, para todos os SSPs, e gás, com o único cenário em que ocorre relativo aumento de uso deste energético sendo o SSP5.

Assim, pode ser ressaltado um aspecto interessante do setor energético, como a intensidade energética dos cenários analisados, exibida na Figura 4.2, com os cenários de base apresentados com a linha preenchida e os cenários com restrição representados pela linha tracejada.

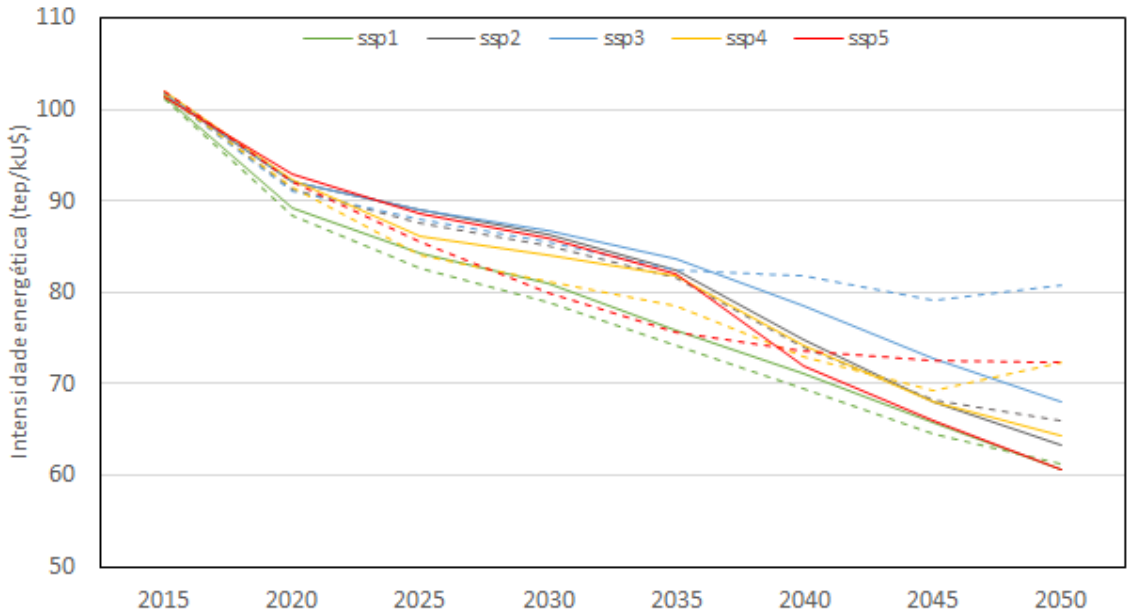


Figura 4.2: Intensidade energética (tep/kUS$) dos cenários analisados, linhas tracejadas representam os cenários de emissão

Fonte: Elaboração própria

Percebe-se em todos os cenários a tendência observada em países desenvolvidos e em boa parte dos países em desenvolvimento[1] de redução na intensidade energética dos mesmos [260, 261], dado o desenvolvimento tecnológico e algumas mudanças comportamentais.

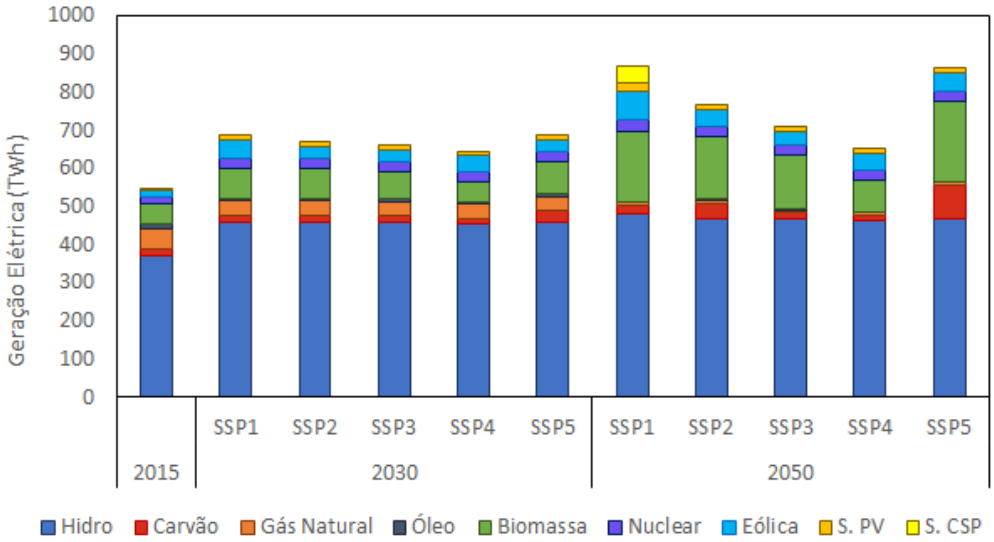
O SSP5 se destaca por ser o cenário com maior evolução no uso de tecnologias eficientes, que se dá no fato deste ser o cenário mais tecnológico e o SSP1, devido a alterações no perfil de consumo. Salvo o caso do SSP1, em que há uma pequena diferença entre a intensidade energética do cenário base e o cenário com restrição, todos os outros cenários apresentaram um aumento na sua intensidade energética no ano de 2050, mesmo com a queda do PIB entre o cenário base e o restritivo. Isto ocorre pelo maior uso de biomassa como fonte primária nas narrativas e com destaque no SSP3, causado pela alta necessidade de redução das emissões nos cenários restritivos.

Demonstrado o uso de energia primária e a intensidade energética, torna-se interessante apresentar como decorre a geração elétrica para cada narrativa.

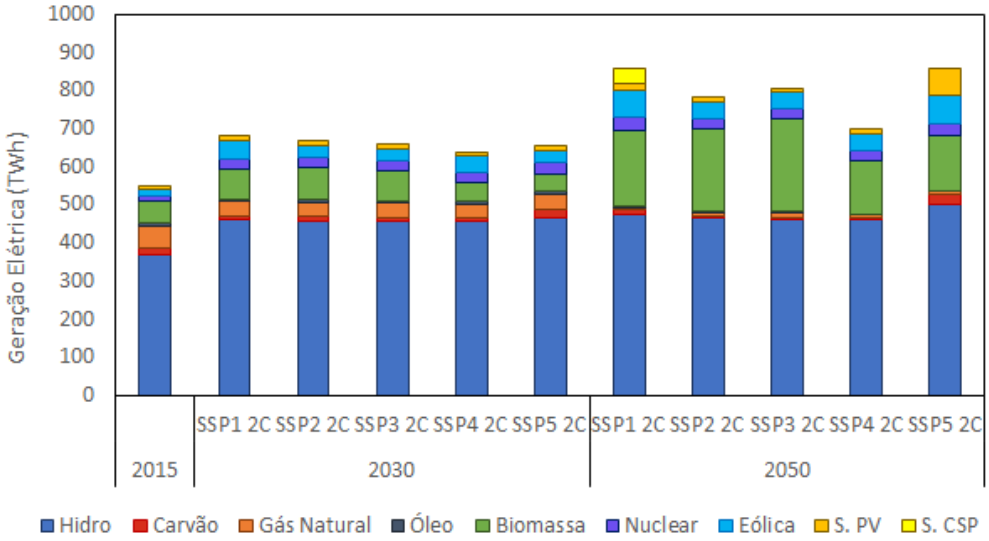
[1]Neste caso deve-se deixar claro que tal tendência nem sempre é observada, principalmente em países pouco desenvolvidos

4.1.2 Geração elétrica

A geração elétrica brasileira tem participação relativamente alta de fontes renováveis, sendo geração hidrelétrica uma das mais representativas [100]. Essa tendência é observada na Figura 4.3, que apresenta a produção elétrica brasileira com uma parcela representativa de fontes hidráulicas, algo que se mostra coerente para todos os cenários.



(a) Cenários base



(b) Cenários com restrição de emissão

Figura 4.3: Geração elétrica (TWh) em 2030 e 2050 para os cenários analisados

Fonte: Elaboração própria
Nota: S.PV: Solar fotovoltaica; S.CSP: Energia solar concentrada.

No ano de 2030, ocorre a saturação de entrada da fonte hidráulica, como já apresentado no Relatório Opções de Mitigação [172] e, com isso, surge a entrada de fontes marginais[2] que variam de acordo com o cenário estudado, como o carvão para o SSP5 e a eólica e a solar para o SSP1, nota-se também que o SSP4, com menor demanda de energia, apresenta a menor entrada de fontes marginais. Deste modo, a geração elétrica a partir do carvão aumenta de maneira acentuada somente no cenário SSP5 base e com restrição de emissão, sendo que tal fonte tem uma saída significativa já neste ano para os outros cenários restritivos. Tal fato é reforçado pela menor utilização deste fóssil como energia primária. Neste mesmo ano, a utilização de energia fotovoltaica é quase idêntica em todos os cenários, que se dá pelo reduzido custo desta tecnologia.

Observa-se o uso elevado de carvão para geração elétrica nos cenários SSP5, sendo esta produção de quase o dobro da média observada nas outras narrativas, que se dá pelo efeito atividade do crescimento econômico somado à crença de que a utilização de fontes fósseis poderá ser resolvida com o acentuado crescimento econômico. A maior razão de uso de carvão para geração entre o cenário base e de restrição de emissão se dá no SSP2, por ser uma narrativa com menores limitações para o seu uso e é menor no SSP1, por este já ser um cenário com menor uso de fontes fósseis. É observável também um maior uso de carvão pelo SSP2 do que pelo SSP3, em que seu uso seria esperado, porém isto ocorre por existir uma demanda energética maior no SSP2, aumentando o seu uso de fontes marginais.

Para o ano de 2050 é de grande interesse notar a geração a partir da tecnologia heliotérmica[3] nos cenários SSP1, por não haver nenhuma planta piloto construída no Brasil, embora esteja indicada a sua entrada no PDE[4] 2029 [262]. Com a entrada desta fonte os cenários do SSP1 ficam com quase 40% de toda sua energia produzida, excluindo a geração hídrica, por fontes renováveis no ano de 2050, quase dobrando a participação destas fontes entre os dois períodos apresentados.

No cenário base e no cenário com restrição de emissão é possível notar a proximidade de energia gerada em 2050 no SSP1 e no SSP5, que pode ser contrastada com a energia primária apresentada anteriormente. Isso se dá, em parte, pelo efeito estrutura do cenário mais sustentável e pela maior possibilidade de eletrificação pelo setor industrial e de transportes.

Já o SSP4 se mantém de maneira estável como o menor em nível de geração, que poderia ser visto como um cenário mais eficiente. Isto ocorre, porém, devido ao menor

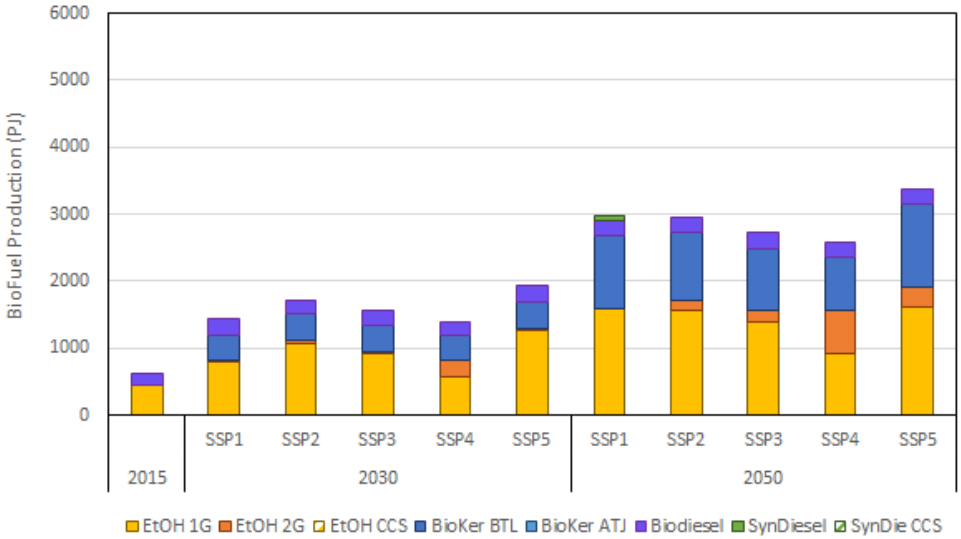
[2]São representadas pelas fontes com menor custo marginal de operação.
[3]Também conhecida como CSP (*Concentrated Solar Power).*
[4]Plano Decenal de Expansão de Energia

crescimento econômico deste cenário, que acarreta em uma menor demanda energética.

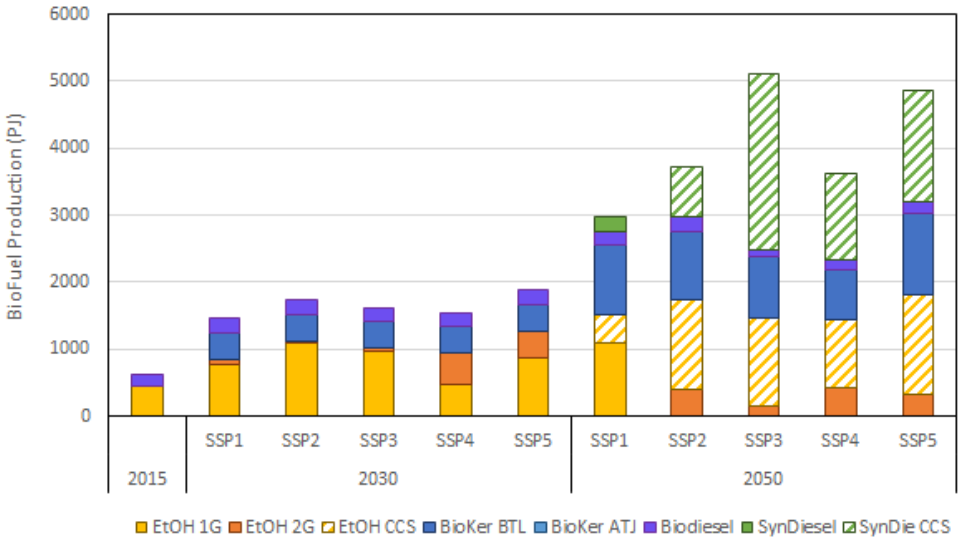
Outro resultado que se relaciona ao uso de energia primária é o uso de biocombustíveis, apresentado a seguir.

4.1.3 Biocombustíveis

Nos últimos anos o consumo de etanol no Brasil se deu de forma elevada, sendo este com significativamente alto uso para o setor de transportes de passageiro [205]. Tal tendência continua sendo observada em todos os cenários, como pode ser observado na Figura 4.4.



(a) Cenários base



(b) Cenários com restrição de emissão

Figura 4.4: Produção de biocombustíveis (PJ) em 2030 e 2050 para os cenários analisados

Fonte: Elaboração própria

É observada uma pequena alteração na produção de biodiesel e bioquerosene de aviação nos cenários base e até o ano de 2030 no cenário restritivo. O mesmo fato ocorre em todos os períodos do cenário base para o consumo total de etanol, que só se altera em sua composição ao poder ser feito de primeira ou segunda geração. Para o cenário de restrição de emissão ocorre a mesma pequena variação na produção do etanol, mas com maior variação na sua composição em alguns cenários, como a entrada de etanol por BioCCS e do etanol de segunda geração. A constante utilização de etanol se dá pela inserção das novas tecnologias no setor de transportes do modelo, que geram uma sobrevida para o setor sucroalcooleiro e para a utilização deste energético, fato que não ocorria em análises anteriores como no relatório de Opções de Mitigação, nos trabalhos de Lucena *et al.* e Rochedo *et al.* [55, 82, 172].

Como observado anteriormente, no cenário restritivo o uso de biodiesel se reduz, em parte pelo menor uso de diesel fóssil para a produção do seu *blend*.

O diesel sintético entra de forma marginal no fim do período de análise do SSP1, possivelmente devido à precificação de carbono existente neste cenário. Para os cenários restritivos, há uma forte utilização de diesel sintético como solução para redução das emissões do setor de transporte de carga que, com a entrada de novas tecnologias, tem um menor consumo de diesel do que em outros cenários estudados.

Nos cenários de política climática há um elevado aumento na utilização de biocombustíveis, principalmente os que fazem uso da rota de BioCCS. Isto se faz necessário nestes cenários para possibilitar o uso de emissões negativas que facultam alcançar o orçamento de carbono destes cenários, com destaque para o diesel. Como vai ficar claro na Subseção 4.1.8, apesar da introdução de novas tecnologias de eletrificação para o transporte de carga, o uso de biocombustível avançado com captura de carbono se mostrou como a principal opção de mitigação para o transporte de carga.

Apresentados os usos e a produção energética e de energéticos relevantes para este trabalho, agora podem ser tratadas as modificações de uso do solo.

4.1.4 Uso do solo

Para as modificações referentes ao uso do solo, foram criados três parâmetros chave para as mudanças entre os cenários: mudança de hábitos alimentares, desmatamento e produção agropecuária sustentável com a implementação de orgânicos. Desta forma, tais premissas foram adotadas para os 10 cenários analisados, porém deve-se atentar ao fato que o desmatamento ocorre de maneira exógena nos cenários restritivos até o ano de 2030, depois é permitido ao modelo que altere sem restrições o seu uso do solo. Deste

modo, é apresentada a mudança de uso do solo acumulada em 2050 na Figura 4.5.

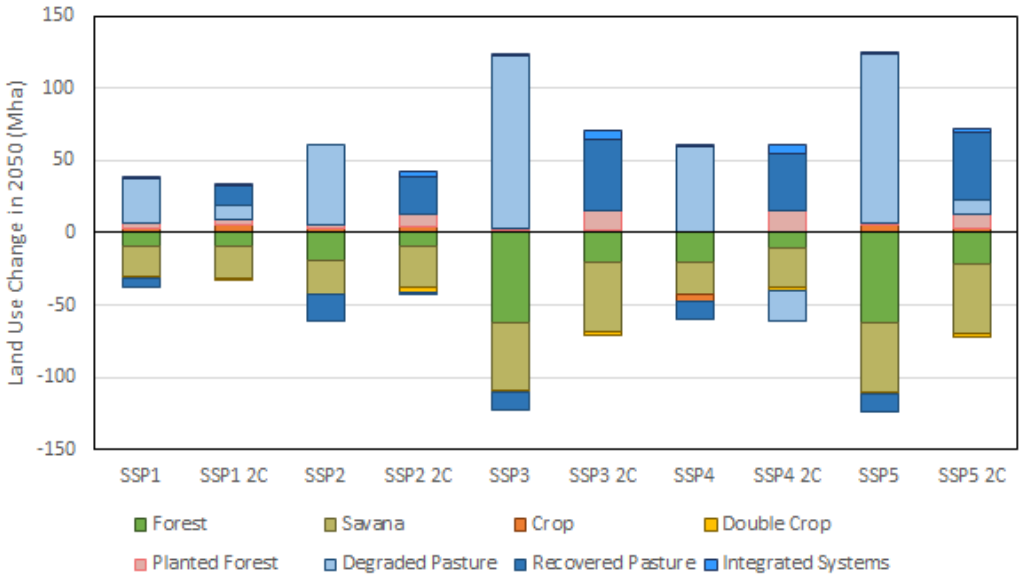


Figura 4.5: Mudança de uso do solo (Mha) acumulada em 2050
Fonte: Elaboração própria

Uma observação importante é a redução cumulativa das mudanças de uso do solo em quase todos os cenários base e seus respectivos cenários com restrição de emissão, com grandes alterações ocorrendo no SSP3 e no SSP5, pois são cenários com maior desmatamento, seguindo as narrativas que os governam.

É notória a redução no nível de desmatamento em todos os cenários restritivos, com esta alteração se tornando mais aparente ao se falar nos níveis de emissão. Há uma redução de quase 70% no desmatamento de florestas do SSP3 e do SSP5, sendo esta redução de quase 50% nos SSPs 2 e 4 e próximo de 5% no SSP1, sendo este o cenário com menor taxa de perda de cobertura de florestas e savanas para novas áreas agropecuárias, indo de acordo com a premissa mais sustentável e de maior conscientização de hábitos alimentares para a preservação do meio ambiente.

Percebe-se, também, que o reflorestamento não é utilizado de maneira significativa como medida para mitigar as emissões de uso do solo no SSP3 e no SSP5, mostrando que há desmatamento líquido até 2050 em todos os cenários, inclusive o mais sustentável. A maior mudança de uso do solo ocorre na utilização de pasto recuperado para para expansão da criação bovina, dada uma maior fixação líquida de carbono no solo nesta recuperação e com aumento na produtividade, como visto em Koberle e Angelkorte [25, 94]. Tal resultado é corroborado pelos trabalhos de Rochedo *et al.* e Lucena *et al.* [55, 82], que obtiveram observações parecidas.

Há mais florestas plantadas nos cenários restritivos, que se dá pela necessidade de maior entrada de biocombustíveis de segunda geração nestes cenários, como no SSP3 em que há 14 vezes mais florestas plantadas em seu cenário restritivo do que quando comparado ao cenário base. Isto é reforçado pela reduzida penetração deste biocombustível no SSP1 e seu minguante nível de plantio de florestas nesta narrativa.

No cenário SSP4 base há uma demanda alimentar menor, então tem-se também uma redução na área de produção agrícola; já os SSPs 1, 2 e 3 comprimem aproximadamente 45 milhões de hectares de produção, sendo que o SSP5 é o cenário com maior produção alimentar devido à sua maior demanda.

Referente ao parâmetro supracitado de mudanças de hábitos alimentares quanto ao consumo de carne, os cenários SSP4 apresentaram os menores volumes de produção agropecuária, da mesma forma como o SSP1 apresentou produção inferior às dos SSP3 e SSP5, boa parte por consequência da alteração no perfil da demanda alimentar dos primeiros cenários citados. Ocorre também uma redução de oferta dos produtos agropecuários, sendo que o setor com maior redução foi o de pecuária de corte. Há um grande aumento na produção agropecuária nos cenários SSP5, devido a exportação de carne e à necessidade do atendimento da demanda interna. No cenário restritivo do SSP3, há a necessidade de intensificação e aumento de produtividade agropecuária devido a menor disponibilidade de novas terras em áreas de preservação ambiental. Há também uma redução nas emissões de metano entre todos os cenários base e os restritivos, devido a intensificação na produção pecuária.

Já no que se refere às emissões de óxido nitroso deve-se citar o SSP5 como maior emissor deste gás entre os cenários, devido ao seu elevado uso de fertilizantes, causado por ser um cenário intensivo em recursos e de maior crescimento econômico. Já os SSPs 2 e 3 estão em níveis parecidos de emissão deste gás, sendo que o SSP1, devido ao uso de tecnologias orgânicas introduzidas por Angelkorte [25], se aproxima do patamar de emissão do SSP4, que teve o menor uso de área agrícola.

Introduzida a emissão destes gases contabilizados pelo modelo, torna-se interessante apresentar como ocorrem as emissões dos demais setores nos cenários dos SSPs.

4.1.5 Emissões

Como apresentado na Seção 3.6, o orçamento de carbono dos cenários de restrição de emissão são estimados pelo TEA e então são usados como dado de entrada na simulação de tais cenários. Deste modo, torna-se interessante apresentar o comparativo entre as emissões realizadas nos cenários de base e seus respectivos orçamentos de carbono, como mostrado na Figura 4.6.

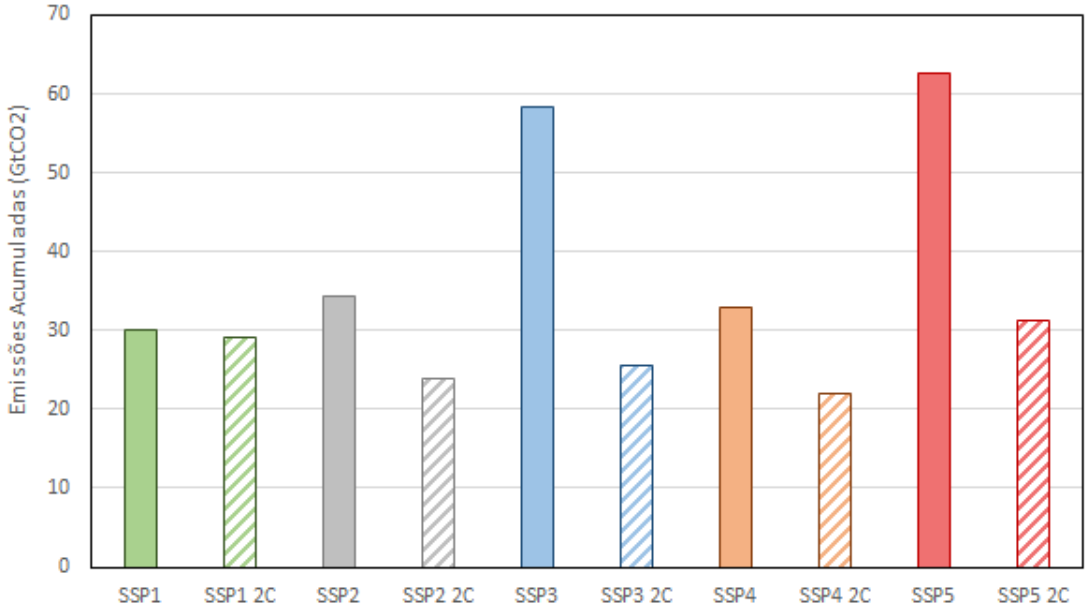


Figura 4.6: Emissões acumuladas ($GtCO_2$) entre 2010 e 2050
Fonte: Elaboração própria

A partir desta figura é possível perceber o quanto cada cenário precisa reduzir em suas emissões, sendo o SSP1 a narrativa com menor necessidade de redução, devido ao seu alto controle no desmatamento e maior uso de energia renovável, por ser uma narrativa mais sustentável. O SSP2 e SSP4 apresentam um esforço de redução de cerca de 10 $GtCO_2$ cada, o que corresponde a uma redução de cerca de um terço das emissões de cada cenário. Por fim, o SSP3 e SSP5 apresentam a maior diferença entre a emissão realizada no cenário de base e a que é devida ao Brasil no cenário restritivo, precisando reduzir cerca de 20 a 25 $GtCO_2$ cada, ou cerca de metade das emissões de CO_2. Mostrada a diferença comparativa entre as emissões, pode ser agora apresentado o resultado da trajetória de emissão dos cenários, como visto na Figura 4.7.

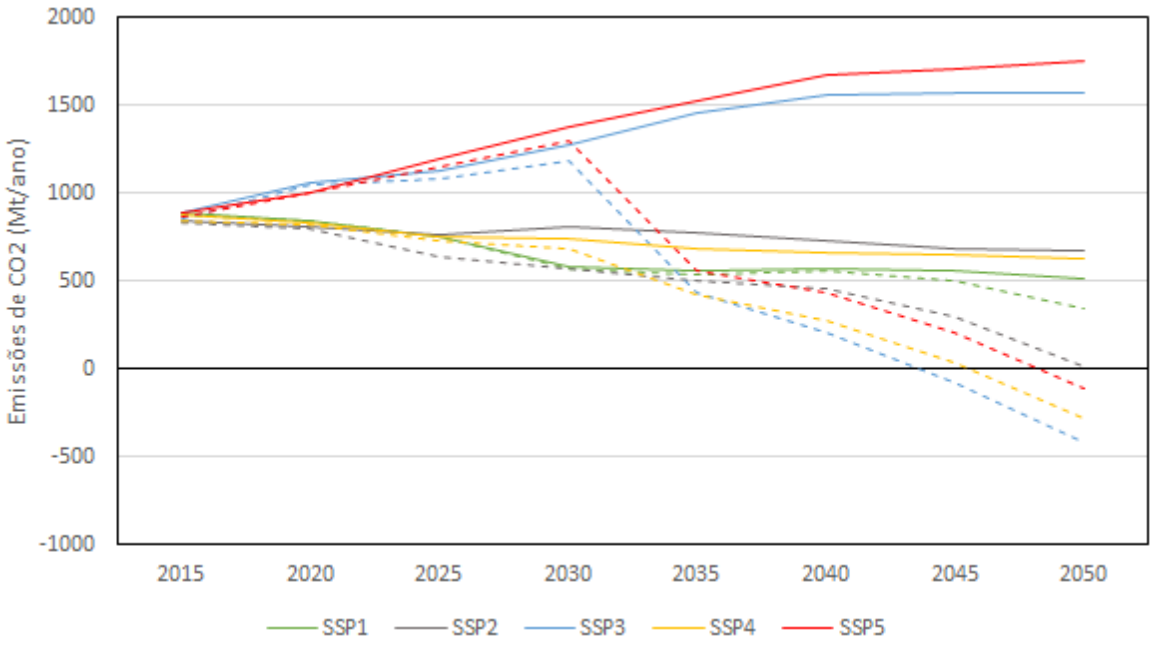


Figura 4.7: Trajetória das emissões de CO_2 (Mt/ano) nos cenários analisados, com as linhas tracejadas representando os respectivos cenários de emissão
Fonte: Elaboração própria

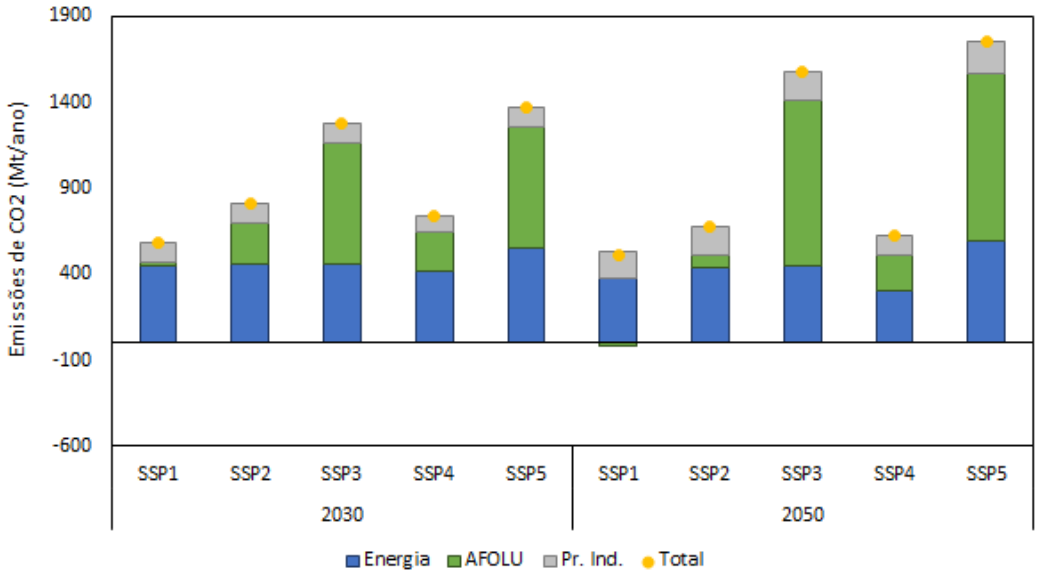
A Figura 4.7 apresenta o esforço necessário pelos cenários SSP3, SSP4 e SSP5 para alcançar o patamar de emissão dos seus cenários restritivos, obrigando-os a fazer uso de tecnologias de emissão negativa para tal e, como já indicado anteriormente, isto pode ocorrer a partir de medidas relacionadas ao uso do solo e, principalmente, o uso de BioCCS. A narrativa do SSP2 quase se tornando carbono neutra no fim do período de análise e o SSP1 alcançando seu *budget* com um leve esforço, devido ao controle no desmatamento.

É ainda possível afirmar que a restrição de não diferenciação na mudança de uso do solo entre os cenários base e seus respectivos cenários restritivos até 2030, usada nos cenários SSP1, SSP3, SSP4 e SSP5, pouco permite que ocorra mudança significativa nas trajetórias de emissão até este ano. Porém, a redução significativa de emissões de CO_2 nos cenários SSP3, SSP4 e SSP5 ocorrem no mesmo período.

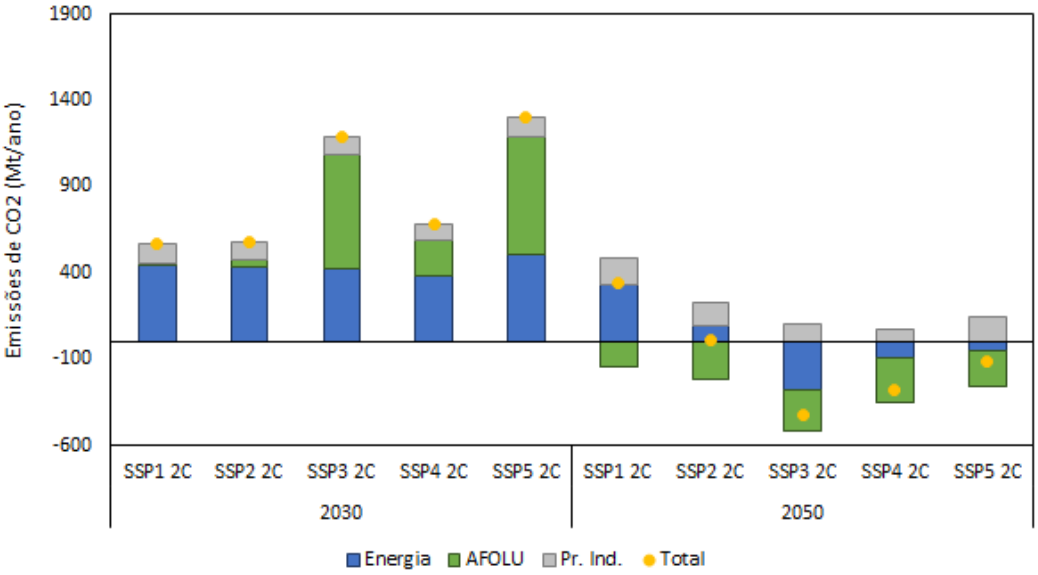
Conhecendo o esforço necessário para cada cenário atingir suas metas de emissão e a trajetória realizada para tal, recorre-se à Figura 4.8 para auxiliar na desagregação das emissões por fonte, sendo o ponto amarelo o total líquido de emissão por cenário.

No cenário de base, somente o SSP1 é marginalmente negativo em suas emissões de uso do solo. Já nos cenários com restrição de emissão, nota-se o elevado esforço realizado nos cenários dos SSPs 2, 3, 4 e 5 para compensar as suas emissões, principalmente as

referentes aos processos industriais, que pouco se reduzem. Este esforço se dá, em parte, no já visto aumento na pastagem recuperada nestes cenários.



(a) Cenários base



(b) Cenários com restrição de emissão

Figura 4.8: Emissões de CO_2 (Mt/ano) em 2030 e 2050 para os cenários analisados

Fonte: Elaboração própria

No SSP1 ocorre uma mudança marginal nas emissões do sistema energético que é compatível com o esforço deste cenário para atingir o seu orçamento compatível com o aumento de até 2°C, enquanto no SSP2 há uma redução considerável das mesmas,

quase tornando-o carbono negativo, sendo esta redução considerável realizada no setor energético e com o setor de uso do solo se tornando carbono negativo. Já no SSP3, SSP4 e SSP5 é observada a transformação do setor energético em carbono negativa, pois suas emissões não caem rápido o suficiente para tornar desnecessário o uso de BioCCS, além da captura do CO_2 pelo setor de uso do solo. Isto faz-se necessário para compensar o desmatamento que ocorre até o ano de 2030, somado às emissões de processos industriais e às emissões energéticas. Em tese, uma redução mais agressiva nas emissões de energia poderiam reduzir a dependência de tecnologias de carbono negativas para atingir o orçamento de CO_2, porém esta não foi a trajetória escolhida pelo modelo.

Assim, pode ser indicado um resultado interessante sobre a emissão de CO_2 nos cenários analisados, que é o indicador de intensidade de carbono, exibido na Figura 4.9, com os cenários de base representados pela linha preenchida e os cenários com restrição de emissão apresentados pela linha tracejada.

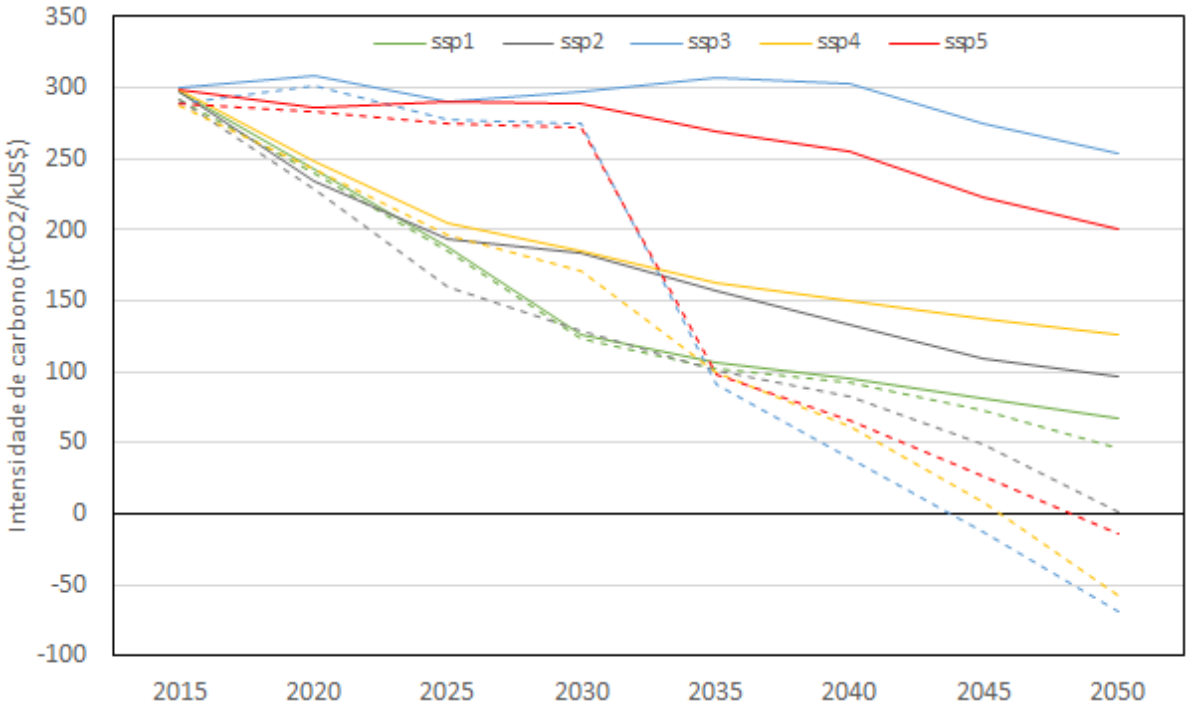


Figura 4.9: Intensidade de carbono (tCO_2/kUS$) dos cenários analisados
Fonte: Elaboração própria

A intensidade de carbono se mostra inferior nos cenários restritivos, pois a redução necessária para atingir o orçamento de emissões é maior do que a redução do PIB nestes cenários. É interessante notar que, no fim do período de análise, ocorre quase o espelhamento das curvas, sendo os cenários base do SSP3 e SSP5 se deslocam de sua elevada

intensidade de carbono para os menores níveis nos cenários restritivos.

Com a diferenciação das emissões dos cenários apresentadas, torna-se possível exibir em quais setores ocorre a maior parte das mitigações nestes cenários, auxiliando no entendimento sobre possíveis políticas públicas a serem aplicadas.

4.1.6 Contribuição setorial para a mitigação de emissões

Para que os cenários dos SSPs base consigam alcançar os níveis de emissão referentes ao aumento de dois graus, faz-se necessário reduzir suas emissões, com estes esforços se distribuindo de forma diferenciada nos setores econômicos, dada a capacidade e os custos de cada setor reduzir suas próprias emissões. Deste modo, a Figura 4.10 apresenta a mitigação setorial cumulativa nos anos de 2030 e 2050 para os cenários analisados.

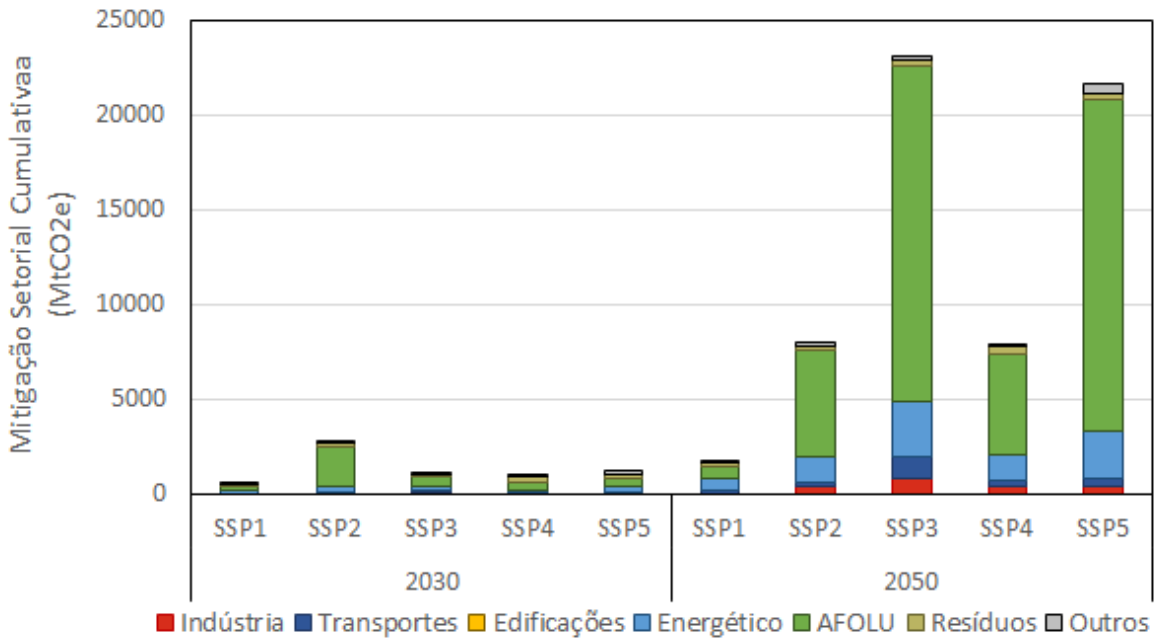


Figura 4.10: Mitigação setorial cumulativa ($MtCO_2eq$) nos anos de 2030 e 2050
Fonte: Elaboração própria

Como já observado anteriormente, as alterações no uso do solo compreendem boa parte da mitigação de emissão, fazendo-se necessário o auxílio da Figura C.3 para observar como ocorre a mitigação nos setores ao se desconsiderar a mitigação causada no uso do solo. A partir disso, observa-se que o setor energético, industrial e de transportes são os mais relevantes ao se desconsiderar AFOLU. Deste modo, estes setores são apresentados a seguir, sendo o setor energético já apresentado anteriormente.

É possível extrair, agora, como ocorre a mitigação em setores específicos por cenário, como a participação do setor industrial e de transportes para a mitigação do SSP3, além de todo o esforço já apresentado no uso do solo e no setor energético. Tais setores mostram-se menos significativos nos outros cenários, sendo que no SSP1 não chega a ocorrer mitigação no setor industrial.

Ao se desconsiderar as emissões relativas ao uso do solo, o SSP1 precisa mitigar um pouco mais que 1 $GtCO_2e$ nos outros setores, com tal valor sendo duas vezes maior para os SSPs 2 e 4, ocorrendo um esforço ainda maior para os outros cenários.

Apresentada a mitigação ocorrida em setores específicos do BLUES, podem agora ser apresentadas as especificidades dos setores modificados neste trabalho.

4.1.7 Setor industrial

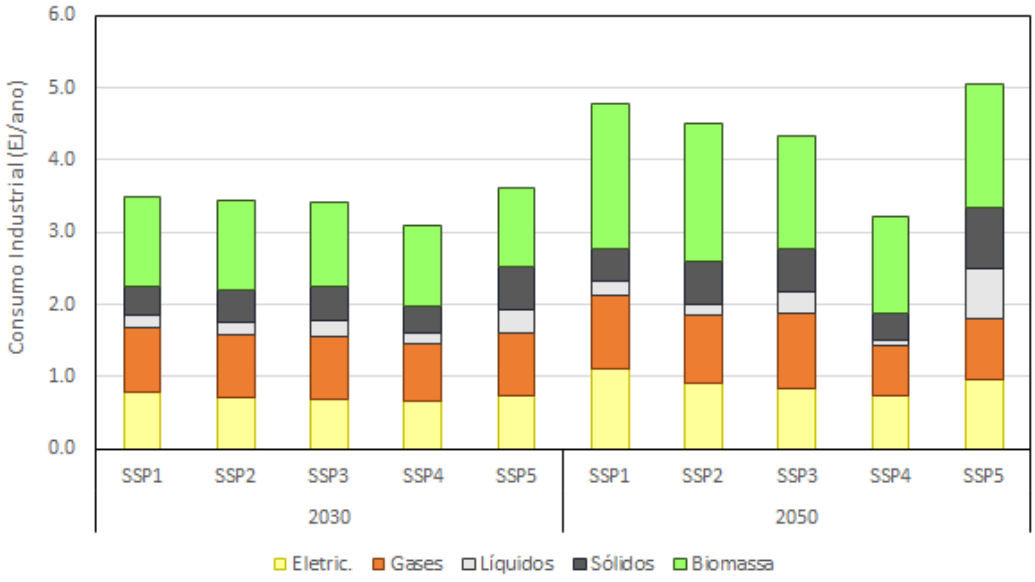
O setor industrial foi responsável por quase 32% do consumo energético brasileiro no ano de 2018 [100]. Dada a importância da participação deste setor em consumo, faz-se necessário apresentar o seu consumo energético por cenário, como visto na Figura 4.11. O consumo de gases engloba o gás natural e o GLP[5], de líquidos representa o consumo de diesel e óleo combustível, os sólidos se refletem no uso de coque e carvão e a biomassa é constituída pela aplicação da biomassa e do carvão vegetal.

Antes de se iniciar uma análise sobre o consumo energético deste setor, deve ser abordada uma informação possivelmente contra intuitiva, porém necessária para a compreensão do aumento do consumo entre os cenários base e os restritivos. Como apresentado na Figura 3.12, há uma relativa redução no PIB nos cenários de políticas climáticas, porém tal redução não necessariamente implica na perda de produção de todos os setores da economia, ocorrendo, até, o aumento na demanda de setores específicos, como o setor de siderurgia em determinados cenários. Isto pode, por sua vez, acarretar no aumento do consumo de alguns energéticos ocasionados somente por um efeito atividade.

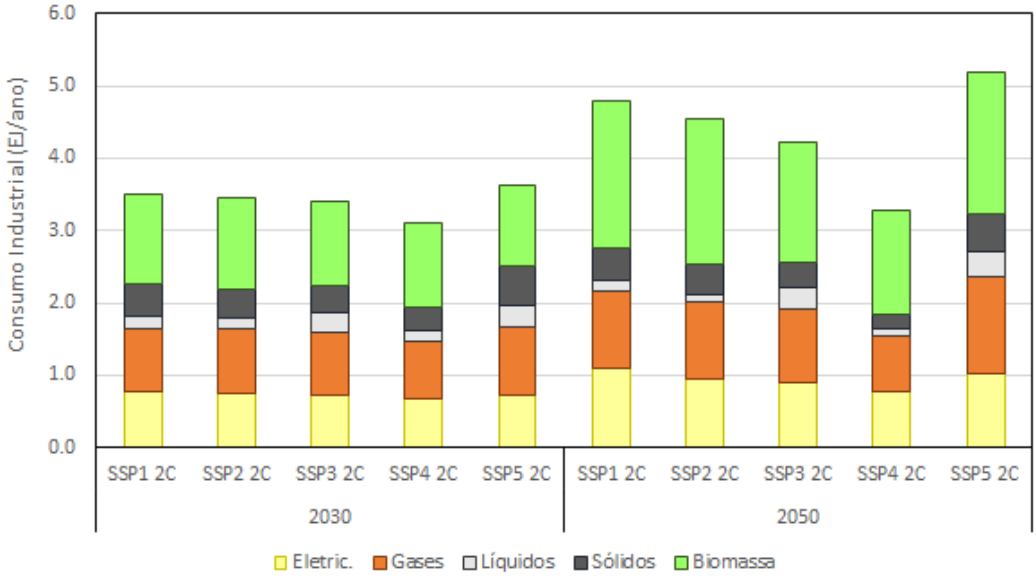
Pouca mudança ocorre nos setores industriais entre os cenários no ano de 2030, bem como ao comparar os cenários base com os restritivos, como era esperado ao se observar a Figura 4.10. Assim, a comparação relevante de ser realizada é somente entre os cenários base e restritivo no ano de 2050, como pode ser observado na Seção C.3.

No ano de 2050 ocorre, de maneira geral, um aumento médio de aproximadamente 6% no consumo de eletricidade e biomassa pelos setores industriais, ao serem comparados os cenários restritivos aos de base. Isto se dá pela necessidade destes cenários em buscar alternativas para mitigação e mostra-se ainda maior nos cenários SSP3 e SSP5, com o

[5]Gás liquefeito de petróleo.



(a) Cenários base



(b) Cenários com restrição de emissão

Figura 4.11: Consumo industrial (EJ/ano) em 2030 e 2050 para os cenários analisados

Fonte: Elaboração própria

aumento de 14% no uso de biomassa neste último.

Já o uso de gás cresce de maneira tímida nas narrativas SSP1, SSP2 e SSP4, sendo que este energético perde espaço de utilização no SSP3 e tem um aumento de quase 60% no SSP5, cenário este que altera de maneira agressiva no uso entre fósseis líquidos e sólidos para o uso de gases, que são menos emissores de GEE [263].

O consumo de líquidos se reduz na maioria dos cenários, tendo um leve aumento somente no SSP4. Porém, como visto na Figura 4.4b, o consumo de diesel pode ter aumentado, mas sendo utilizado o diesel sintético com CCS no lugar do diesel fóssil, mitigando a produção industrial neste cenário a partir da redução do fator de emissão que se reduz com a participação de diesel sintético de biomassa[6].

Os sólidos se reduzem, em termos de utilização, em média 30% nos cenários, sendo o SSP1 a narrativa em que ocorreu a menor redução no seu uso. Isso se dá, principalmente, pela proximidade das emissões do cenário base com o orçamento de GEE do cenário restritivo, além da precificação de carbono que já acarretava na redução de uso destes fósseis.

Outra coisa a ser observada é a diferença entre a mitigação do cenário com maior produção e o com menor produção, sendo estes os SSPs 5 e 4, respectivamente. Tal diferença é exibida na Figura 4.12, sendo a linha preenchida do cenário base e a tracejada do cenário restritivo.

Desta forma torna-se perceptível que a possibilidade de mitigação pela indústria está diretamente ligada ao nível de produção, sendo permitido ao SSP5 um maior potencial de redução nas emissões industriais somente causado pelo efeito atividade.

Apresentado um dos setores em que este trabalho se propôs em realizar alterações significativas, deve-se, por fim, apresentar os resultados do setor de transportes.

4.1.8 Setor de transportes

Como apresentado anteriormente, o setor de transportes consome parte significativa dos combustíveis fósseis brasileiros. Por isso, este setor foi escolhido para ser revalidado com novos custos e novas tecnologias no modelo BLUES.

Transporte de passageiros

O transporte de passageiro pode ocorrer por transporte individual, ou seja, por carro e motocicleta, ou por transporte coletivo, como em ônibus ou metrô, e sua alteração por

[6]As emissões negativas da captura de carbono estão alocadas no setor energético. Assim, o diesel sintético possui um fato de emissão zero para fins de consumo energético, igual a um diesel sintético sem captura.

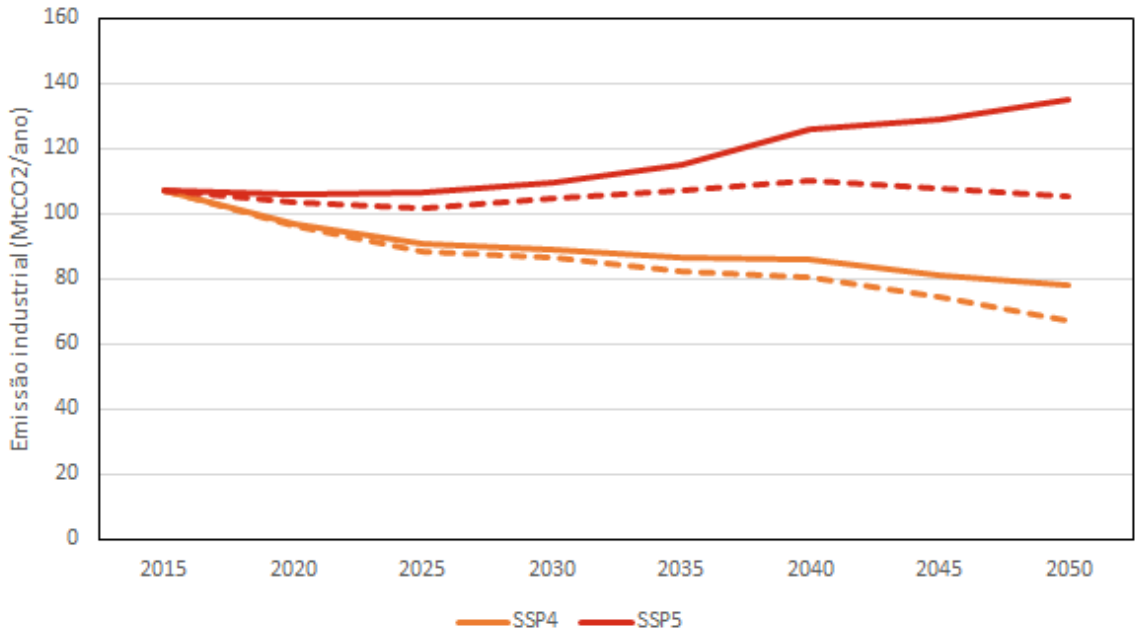


Figura 4.12: Emissão industrial ($MtCO_2eq$) nos cenários base e restritivo do SSP4 e SSP5

Fonte: Elaboração própria

cenário pode ser observada na Figura 4.13 e, visto que as premissas deste setor não se alteravam entre os cenários base e seus respectivos cenários restritivos, este resultado é equivalente para ambos. Esta premissa é indicada como uma limitação, visto que a metodologia poderia se utilizar de premissas diferenciadas por cenário, mas aspectos importantes na mudança modal não são capturadas pelo modelo.

Nota-se uma pequena mudança entre o uso modal para o atendimento da demanda de pkm nos cenários analisados, fato este que ocorre pelas premissas dos cenários analisados. A modelagem de preferência modal pode ser melhor realizada, pois depende de dados como a preferência e escolha do consumidor e nota-se a ausência destes dados para o Brasil [152, 153, 264].

Apesar deste *share* estar relativamente parecido, a premissa de alteração no fator de ocupação faz com que ocorra uma maior redução no consumo energético deste setor, como visto na Figura 4.14.

Percebe-se que a composição do consumo entre os cenários não se altera de forma significativa, tendo ocorrido uma diferença média de 3% no consumo energético dos cenários base com os restritivos. Isto se dá pelo reduzido custo dos veículos já existentes no modelo, como os veículos *flex*, ao compará-los com os novos veículos adicionados,

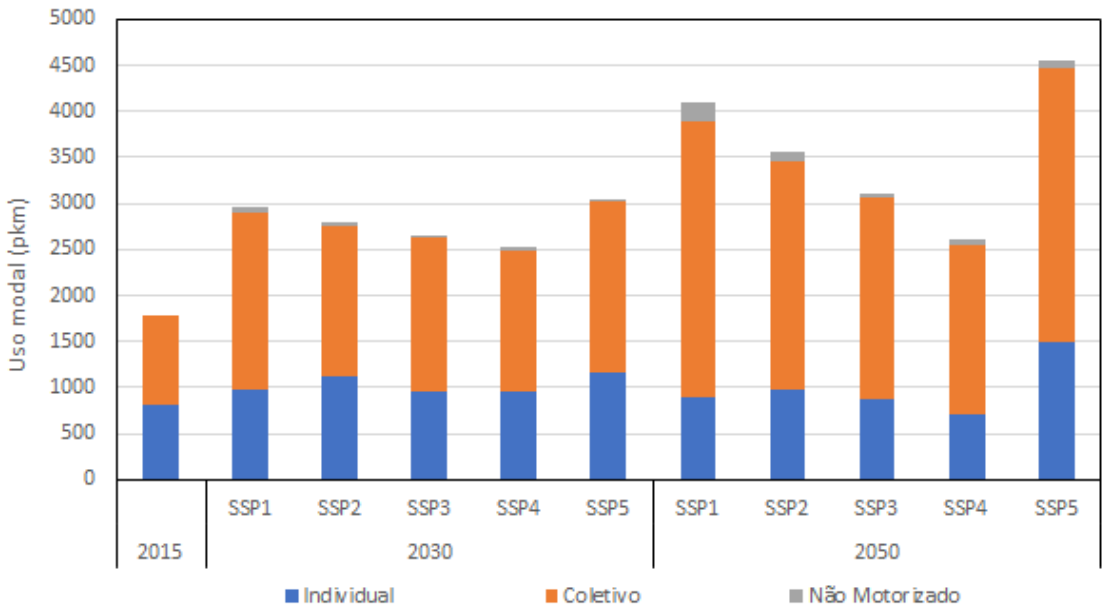
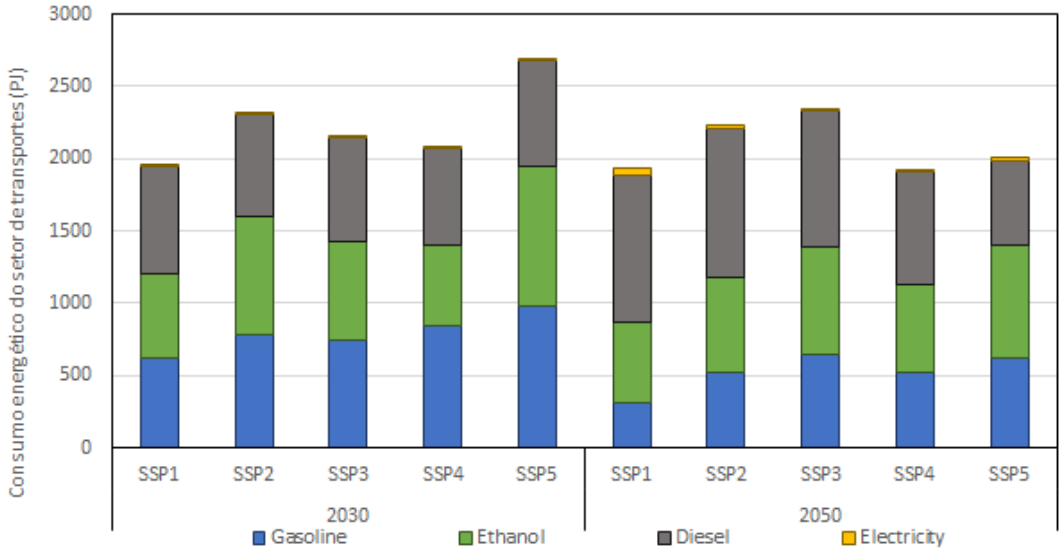


Figura 4.13: Utilização de modal por cenário

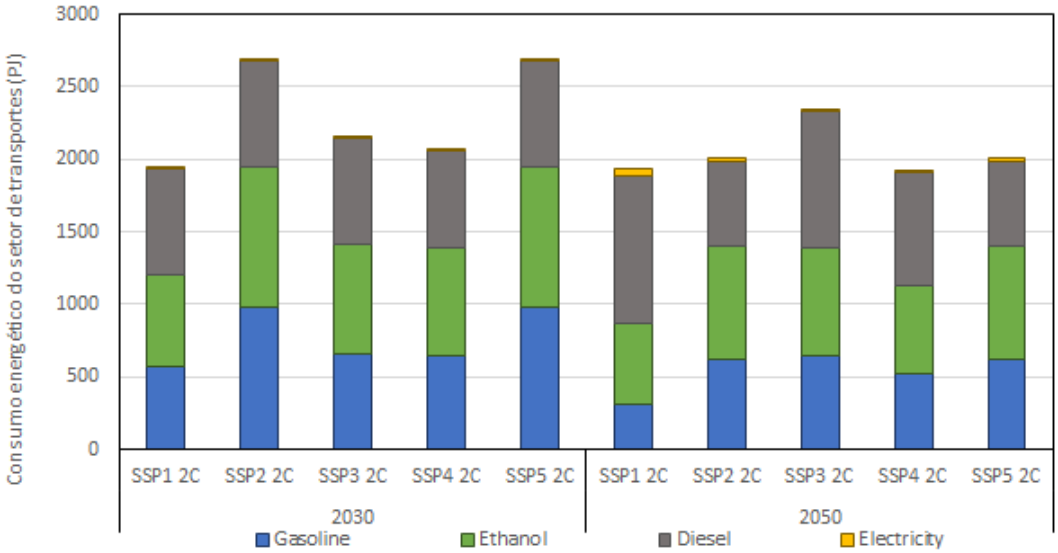
Fonte: Elaboração própria

como o veículo a pilha a combustível a etanol. Isto fez com que a entrada de tais veículos se desse de forma mais significativa nas cidades grandes, causada pela premissa de restrição de poluição nestas cidades. A métrica escolhida para a proibição da poluição foi sobre a não permissão de entrada de veículos a combustão interna menos eficientes, pois não está implementada no modelo a emissão e poluentes atmosféricos, como o material particulado, não possibilitando uma melhor escolha de controle de emissão.

No SSP1, ocorre de maneira razoavelmente rápida a entrada de veículos a pilha a combustível a etanol até o ano de 2030, dada a restrição de poluição das cidades grandes. Porém, com a redução no custo dos veículos elétricos, os veículos a pilha começam a reduzir sua utilização e começam a dar lugar para os veículos elétricos que, pela redução no custo das baterias deste cenário. Há a entrada de veículos comerciais leves e ônibus elétricos e a pilha a combustível a etanol de maneira mais significativa do que nos carros privados. Nota-se que não há a entrada de veículos a pilha a combustível a hidrogênio, devido ao custo associado a infraestrutura necessária para o transporte desse energético.



(a) Cenários base



(b) Cenários com restrição de emissão

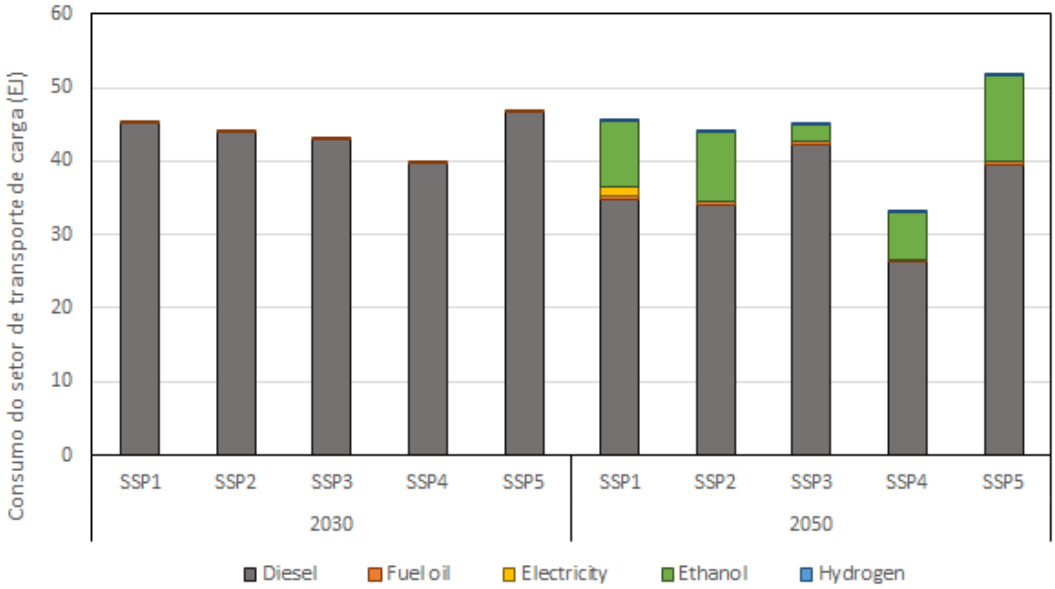
Figura 4.14: Consumo do setor de transporte de passageiro (PJ/ano) em 2030 e 2050 para os cenários analisados

Fonte: Elaboração própria

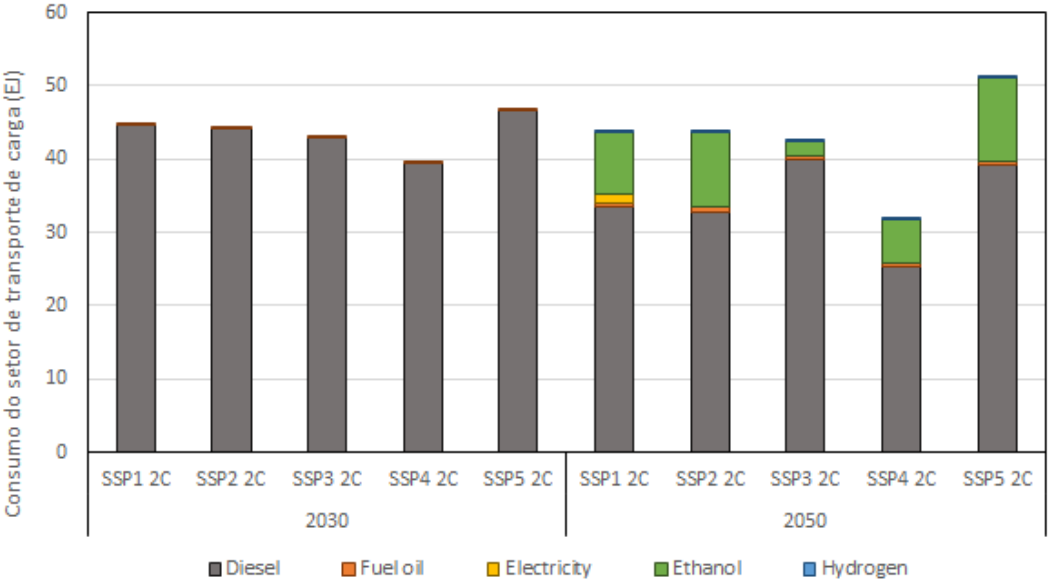
Transporte de carga

Já o setor de transporte de carga têm em sua composição o consumo de combustíveis tipicamente fósseis, sendo o diesel o seu principal insumo. A Figura 4.15 o consumo deste setor nos diferentes cenários analisados.

Figura 4.15: Consumo do setor de transporte de carga (EJ/ano) em 2030 e 2050 para os cenários analisados



(a) Cenários base



(b) Cenários com restrição de emissão

Fonte: Elaboração própria

Em todos os cenários analisados, há o aumento da atividade do setor de transporte de carga entre o ano 2030 e 2050, como apresentado na Figura 3.15. Porém, como pode ser fortemente observado nos cenários do SSP4, há a redução no consumo de combustível

entre os períodos exibidos, que se dá pelo maior aumento na eficiência da frota de caminhões do que no aumento de demanda devido ao menor crescimento econômico deste cenário. Isto também ocorre nos cenários do SSP2 e para o SSP1 e SSP3 restritivos, não sendo observado somente nos cenários SSP5 e causados pelo grande aumento na demanda de transporte de carga.

Não há alteração perceptível até o ano de 2030 entre o cenário base e restritivo, tendo ocorrido uma pequena redução no consumo que é naturalmente causada pela redução da atividade neste setor.

Para o ano de 2050, todos os cenários restritivos contam com uma redução no consumo de diesel quando comparados ao cenário base, há também redução no uso de óleo combustível e no consumo de eletricidade nestes cenários, com um pequeno aumento no consumo de etanol no SSP2. Novamente, esta redução no consumo se dá tanto pelo efeito intensidade do aumento de eficiência como pelo efeito atividade. A entrada de hidrogênio neste setor não chega a representar nem 0,5% do seu consumo energético nos cenários, sendo até reduzida nos cenários de restrição de emissão, com sua entrada mais significativa em caminhões de pequeno porte.

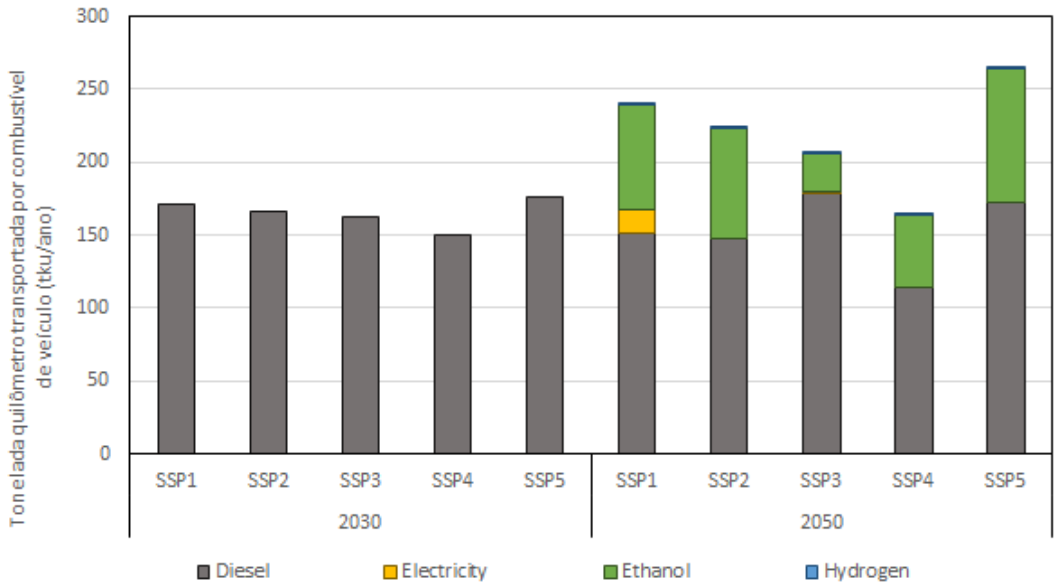
É possível utilizar a tonelada quilômetro transportada por combustível utilizado no veículo como *proxy* para se ter uma ideia da frota de veículos no transporte de carga dos cenários.

Comparando a Figura 4.15 e a Figura 4.16 é possível perceber, comparativamente, como o caminhão elétrico é mais eficiente do que um caminhão a diesel. Porém, devido a necessidade alta redução nas emissões e com o possível uso de BioCCS para emissão negativa pelos cenários restritivos, percebe-se uma queda na frota de caminhões elétricos, visto que o uso de diesel sintético com captura de carbono fez-se necessário em tais cenários, como observado na Figura 4.4b.

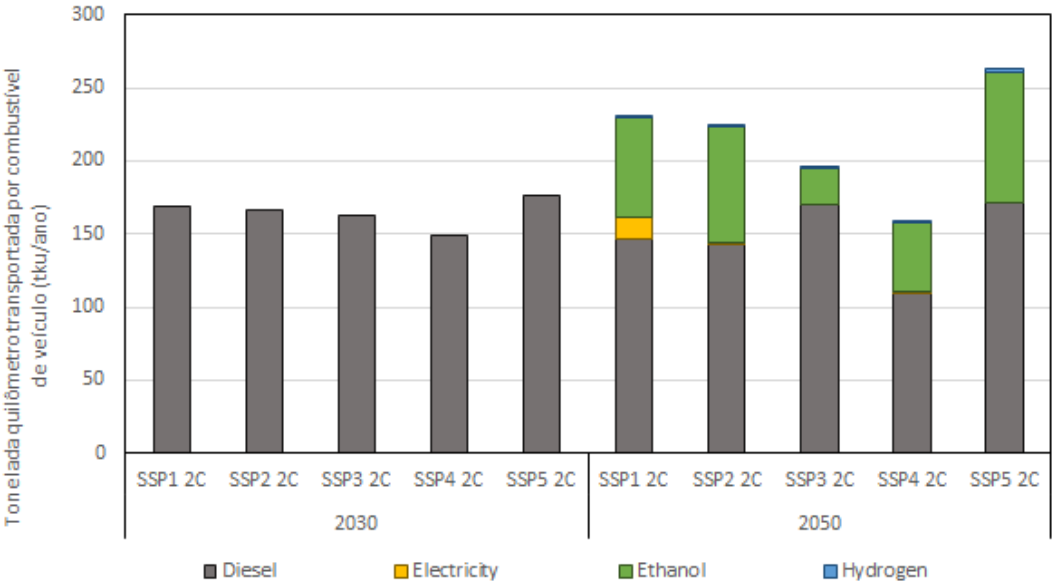
Houve a redução no consumo de diesel pelo efeito atividade corresponde a somente uma pequena fração da mitigação no setor de transportes, sendo essa redução responsável por 5% da da redução de emissões por este setor no SSP3, cenário este com a maior participação de mitigação pelo setor de transportes. Cerca de 60% da mitigação do setor de transportes ocorre com a utilização deste diesel sintético no transporte de carga deste cenário, sendo que praticamente todo o resto dessa mitigação vem do setor de transportes de passageiro.

Com estes resultados dados e apresentados, na próxima seção há a discussão sobre eles e suas possíveis aplicações em políticas públicas.

Figura 4.16: Tonelada-quilômetro transportada (Mtku/ano) por combustível utilizado no veículo em 2030 e 2050 para os cenários analisados



(a) Cenários base



(b) Cenários com restrição de emissão

Fonte: Elaboração própria

4.2 Discussão dos resultados

Nesta seção são avaliados e discutidos os resultados expostos na seção anterior, sendo também discutidas as limitações do modelo e do exercício de modelagem. Estes resultados são usados como maneira de apresentar as modificações realizadas neste trabalho, que é o início da integração entre dois modelos de análise integrada, com uma maior flexibilização do modelo BLUES, em que ocorre um teste utilizando os SSPs para recalibrar alguns aspectos do modelo, como as melhorias no setor industrial e de transportes.

As alterações realizadas por este trabalho facilitaram a entrada dos choques da demanda causados pelas diferentes narrativas dos SSPs, tirando a necessidade de utilização de 12 modelos setoriais e uma redução significativa no homem-hora consumido para implementar estes choques.

Com as modificações realizadas no que tange o consumo energético do setor industrial e de transportes, é possível implementar estas alterações ditadas por diferentes narrativas de maneira simplificada. Isto possibilita uma resposta mais rápida para diferentes análises.

Para o setor de transportes a desagregação entre o nível nacional, regional e municipal permite um refinamento das narrativas, pois os SSPs são cenários de caráter global e, então, torna-se possível tirar proveito destas narrativas de modo a enriquecer as análises a um nível abaixo do nacional, contribuindo com a literatura científica.

Sobre os resultados do modelo com o estudo de caso, é perceptível como as narrativas afetam as escolhas do modelo, desde alterações na demanda até restrições no uso de energéticos. Este fato não determina toda a trajetória do modelo, mas é demasiadamente importante pois estabelece as delimita as restrições matemáticas do espaço de soluções possíveis. A restrição de entrada de uma tecnologia ou uma variação considerável na trajetória de custos, pode alterar significativamente os resultados do modelo. Assim, a análise de cenários com diferentes premissas socioeconômicas e de desenvolvimento tecnológico se mostra como um exercício de diagnóstico para determinar parâmetros, escolhas e tecnologias chave para políticas públicas, com o objetivo de garantir maior sustentabilidade e responsabilidade climática.

Ocorrem alguns resultados que nada mais são do que respostas das premissas dos cenários ou consequências diretas destas, como o SSP1 com maior eletrificação e precisando de menor mitigação para atingir sua restrição de emissões, o SSP3 e o SSP5 se tornando os cenários com maior necessidade de redução de emissão e o SSP2 e SSP4 com resultados próximos, devido às suas premissas próximas.

Há, porém, resultados chave encontrados em todos os cenários de maneira consis-

tente, sendo um destes de grande importância: maiores níveis de desmatamento tornam mais difíceis o enquadramento em metas climáticas. Como visto em Rochedo *et al.* [55], cenários com alto nível de desmatamento precisam de maior esforço dos setores produtivos, como energia e indústria, para compensar uma emissão que não está associada, diretamente, com produção econômica. Assim, de forma a contrabalancear o que foi emitido, os demais setores incorrem em custos adicionais, como maior custo de produção, maior preço dos produtos, maior preço de energéticos, etc.

Como observado nos cenários base, em que o desmatamento era assumido de maneira exógena até 2050 como premissa e até 2030 no cenário restritivo, a Figura 4.7 mostra a magnitude das emissões causadas pelo desmatamento e com a Figura 4.10 exibindo que 90% dessa mitigação se dá pelo controle de desmatamento nos cenários SSP3 e SSP5, reduzindo para 80% no SSP2 e 60% no SSP1 e SSP4.

Com isso, o controle sobre o nível de desmatamento implica em menores níveis de mitigação para os outros setores, sendo que há pouca mudança nas emissões de processo, restando basicamente ao setor energético o restante da mitigação para atingir as emissões compatíveis com o aumento de até 2°C. Assim, medidas que fortaleçam o cumprimento das leis ambientais no Brasil resolveriam parte do esforço que o país deve fazer para alcançar o seu orçamento de emissão, diferente do que tem ocorrido, como com a aprovação da Lei 13.465/2017 [265] e da Medida Provisória 910/2019 [266], em que há o esforço do governo em legalizar o desmatamento e regularizar a grilagem [267].

Tais medidas de cumprimento das leis estão de acordo com o que a maioria da população brasileira vê como razoável [268], além de auxiliar no cumprimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, com potencial benefício para povos indígenas que habitam áreas de proteção ambiental e a manutenção dos biomas [269].

A Figura 4.17 apresenta o quanto de emissão de GEE fica disponível ao setor energético para o cenário SSP5 com restrição, enquanto os esforços de mitigação dos outros cenários se encontram na Seção C.4. A escolha deste cenário se deve apenas de maneira ilustrativa, devido a ordem de grandeza dos valores apresentados.

Nesta figura são apresentadas as emissões relativas ao cenário de base e o *budget* do cenário restritivo. À direita do orçamento, estão dispostas as emissões de processos industriais entre 2010 e 2050, que pouco se alteram entre o cenário base e no cenário de 2°C, as emissões de mudanças de uso do solo entre 2010 e 2030, que são exógenas ao modelo, as emissões energéticas entre 2010 e 2020, que já foram realizadas, e a emissão energética disponível entre 2020 e 2050. O exemplo é do SSP5, mas a figura ajuda a entender o nível de ambição na redução das emissões de CO_2 associadas ao consumo energético, que incluem o setor energético, industrial, edificações e transportes.

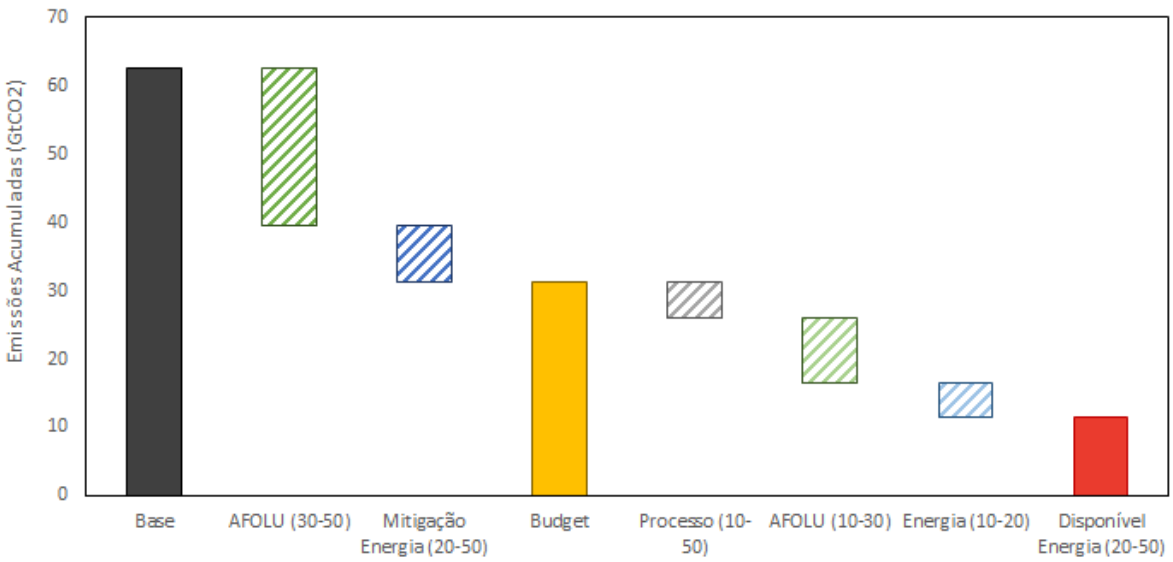


Figura 4.17: Emissões acumuladas ($GtCO_2$) no cenário SSP5
Fonte: Elaboração própria

Boa parte da mitigação já ocorre com mudanças de uso do solo, enquanto o restante é o esforço que há sobre os demais setores da economia. Com isso, torna-se uma escolha para o modelo decidir entre reduzir rapidamente suas emissões, com a rápida entrada de fontes alternativas e com a eletrificação, como visto em cenários de trabalhos internacionais, que estudam cenários sem *overshoot*, como Kriegler *et al.* [128], ou ir para uma rota de emissões negativas, como o que ocorre neste trabalho. Esta discussão é realizada no relatório de 1,5°C do IPCC e não há ainda resposta para tal questionamento [34]. Porém, deve-se levar em conta que tecnologias como o BioCCS ainda estão em fase de maturação tecnológica [270], o que pode ser traduzido em algum nível de otimismo no modelo quanto ao desenvolvimento e a comercialidade destas tecnologias [128, 159, 271].

Dito isso, torna-se interessante apresentar a sobrevida dada ao etanol nos cenários apresentados, a partir da penetração das novas tecnologias de veículos adicionadas ao modelo. Deste modo, ao comparar este resultado com estudos anteriores esta sobrevida se mostra promissora, pois como visto em alguns dos cenários do relatório Opções de Mitigação [172], a perda de mercado do etanol com a entrada de outras tecnologias[7] fazia com que fosse necessário utilizar mais carvão para compensar a energia que era gerada pelo bagaço da cana, e até em trabalhos mais recentes como em Rochedo *et al.* e Lucena *et al.* [55, 82], em que era necessária uma maior penetração de fontes renováveis

[7]No cenário Baixo Carbono, apresentado neste relatório, havia a entrada significativa de veículos híbridos e elétricos

para compensar parte da saída do bagaço.

A reforma embarcada pode permitir ao etanol um espaço dentro das estratégias de eletrificação do setor de transportes. Isto é importante pois permitiria a manutenção de um setor agrícola relevante à economia brasileira, aproveitaria a capacidade instalada e capacitação nacional, além da manutenção de diversos empregos no setor sucroalcooleiro e fazendo uso das características singulares deste setor para produção de biocombustível, que é a sua produção em larga escala e a baixo custo. Outras rotas promissoras para auxiliar neste uso contínuo de etanol, são as rotas de produção de bioquerosene e diesel sintético através da rota de oligomerização [272], e de produção de eteno a partir de biomassa [207], que não fazem parte do escopo deste trabalho. Deve-se ressaltar que o aumento da produção de etanol reflete na transferência do consumo de água do setor energético para o setor de uso do solo, reduzindo também a disponibilidade hídrica dos usuários consuntivos, não consuntivos e para o ecossistema aquático.

A eletrificação representa também uma maior oportunidade para a produção de eletricidade através de fontes renováveis, como visto no SSP1 com a sua premissa de redução de barreiras para que acarretou em uma maior entrada destas fontes, fato distinto ao observado no SSP3, que é uma narrativa onde existem mais barreira e que impedem a entrada de tecnologias importadas, forçando um maior uso de energéticos como o carvão, como também ocorre no SSP5. Com isso, nota-se a necessidade de desenvolvimento destas tecnologias no país para que haja potencial tecnológico para produzi-las. Políticas que facilitem a transferência tecnológica e de importação de tecnologias também favoreceriam o desenvolvimento destas fontes e nos traria mais próximos do SSP1. Um incentivo ao desenvolvimento de fontes renováveis no país pode trazer cobenefícios como a vantagem competitiva advinda da detenção de patentes destas tecnologias, como em algumas ainda não difundidas, como a eólica *offshore*, a fotovoltaica flutuante, a heliotérmica, entre outras.

O cenário SSP3 acabou por ter que fazer uso de mais BioCCS para compensar a dificuldade de entrada de energias renováveis no setor elétrico brasileiro. Deste modo, observa-se a oportunidade, através do estudo e pesquisas sobre o BioCCS, de transformar o Brasil em um *player* exportador desta tecnologia.

Neste trabalho foi realizada a suavização da alteração do uso de energéticos pelos setores indústrias, obtendo uma maior proximidade com o que ocorre na realidade, como também um refinamento no limite dos potenciais de mitigação de certos setores. Ainda, deve haver um esforço maior para realizar a calibragem do modelo com períodos mais atuais, como o ano de 2015 e 2020.

Foram também incorporadas novas tecnologias e cenários com diferentes premissas

no modelo. Estes cenários fizeram uma significativa escolha pela tecnologia adicionada de veículos a pilha a etanol, que é uma tecnologia ainda em estágio relativamente baixo de desenvolvimento e possivelmente só o Brasil e os Estados Unidos terão interesse em desenvolvê-la. Tais veículos podem ser importantes como estratégia de eletrificação da frota, dado que o impacto sobre a infraestrutura de abastecimento é inexistente, diferente da infraestrutura necessária para a produção e distribuição de hidrogênio e do leve preparo necessário na rede de distribuição elétrica para a entrada dos veículos elétricos a bateria, fora problemas como a potencial demora no tempo de recarga enfrentado pelo veículo a bateria, sendo que estes aspectos não são valorados pelo modelo. Esta não valoração acarreta em um otimismo na penetração dos caminhões elétricos, dado que o custo da infraestrutura e o aumento no tempo de recarga podem acarretar no aumento do custo de frete.

Estes novos veículos permitiram o atendimento da restrição sobre poluição atmosférica na cidade grande, porém deve-se ressaltar que ainda não há a contabilização destes poluentes no modelo e isto pode acarretar em um resultado tendencioso para a entrada destes veículos.

Há também a necessidade de maiores estudos sobre o setor de edificações e resíduos, a partir de uma maior desagregação nos mesmos, como a separação por classe de renda no setor residencial e a diferenciação regional. Pode ser estudada a entrada de novas tecnologias, como *smart buildings*, *zero energy buildings*, internet das coisas e a inteligência artificial, e como esta entrada afetaria tais setores. Além disso, no setor de edificações e, indiretamente no setor de resíduos, podem ser analisadas diferentes premissas de perfil consumo, compatíveis com os cenários dos SSPs, e como estas alterariam o perfil tecnológico, de consumo de energia e de emissões de GEE.

Ainda, a heterogeneidade do SSP4 pode ser mais explorada a partir da desagregação do setor residencial, permitindo uma análise mais detalhada sobre este setor.

Assim, no próximo capítulo é apresentada a conclusão deste trabalho e os indicativos para trabalhos futuros.

Capítulo 5

Considerações finais

Esta dissertação propôs-se a atualizar um modelo de análise integrada brasileiro, facilitando sua integração com um modelo de equilíbrio geral global a partir de alterações significativas no setor industrial e de transportes. Como estudo de caso, são implementados os cenários dos *Shared Socioeconomic Pathways* e complementadas as premissas de um estudo paralelo a este trabalho.

Para isto foi utilizado o BLUES, que é um modelo de análise integrada nacional desenvolvido pelo laboratório Cenergia no qual diversos trabalhos já foram baseados [55, 92, 109]. Neste trabalho foi revisto o perfil tecnológico da indústria, pois foram identificas algumas oportunidades de melhoria e atualização e também no setor de transportes, já que a eletrificação se mostra como algo mais iminente do que em estudos anteriores, mesmo que partindo de outras tecnologias de veículos elétricos, como com a pilha a hidrogênio ou a partir da pilha a etanol. Há, também, a modernização da redução de custo das fontes solar e eólica, que constavam como desatualizadas no modelo.

Como estudo de caso, os cenários dos SSPs descrevem diferentes linhas narrativas de futuros possíveis, tendo sido criados para facilitar a comparação entre os diferentes IAMs globais. Tais cenários têm uma alta relevância que até hoje não era explorada em sua completude por grupos de pesquisa no Brasil, tendo sido realizados diferentes trabalhos utilizando a narrativa do SSP2, como a tese de Koberle [94], a tese de Rochedo [26], a dissertação de Angelkorte [25], entre outros. Então este trabalho torna-se um facilitador para a exploração de mais narrativas dentro de um IAM nacional.

De maneira a melhorar um pouco a desagregação da análise, são separadas as demandas do setor de transportes das regiões brasileiras em cidades pequenas, médias e grandes, possibilitando análises mais diferenciadas, como a restrição de poluição em cidades grandes e a diferenciação de uso modal entre cidades.

No entanto, a modificação modal ainda é muito limitada, podendo ser incorporado o tempo de viagem por transporte, o tempo para o abastecimento do veículo, a possível aversão cultural a novas tecnologias, a falta de infraestrutura adequada em diferentes regiões, entre outros.

Os resultados deste trabalho mostraram o grande impacto que o desmatamento tem sobre os outros setores brasileiros em cenários de restrição de emissão, bem como o maior uso de fontes renováveis em alguns cenários. Como no SSP1 para o setor energético e no SSP3 restritivo para produção de biocombustíveis. Foi apresentado o potencial de entrada de veículos a pilha a combustível a etanol, que podem ser utilizados como uma rota para o aproveitamento da infraestrutura já existente do setor sucroalcooleiro no país.

Estas diferentes narrativas não só apresentam resultados diferentes a partir de premissas macroeconômicas diferentes, mas também demonstram como pode se desenvolver o setor energético brasileiro a partir de narrativas dispares entre si. Esta análise identifica as melhores opções custo-efetivas existentes no modelo, porém não levam em conta fatores externos, além de considerar o conhecimento de informação perfeita em todo o período de análise.

Nesse sentido, este estudo mostra-se bem sucedido, visto que foi possível implementar estas diferentes narrativas e analisá-las. Deste modo, este trabalho é o início de um esforço que se inicia para a implementação da metodologia proposta de troca de informações entre o modelo TEA e o modelo BLUES, que deve ser continuada para facilitar a comunicação entre estes modelos.

Algumas limitações chave devem ser avaliadas, como a necessidade de atualização do setor de edificações, com um foco no setor residencial. Com a possível desagregação em níveis de renda do setor residencial, existem aspectos específicos das narrativas que podem ser melhor explorados, como a heterogeneidade dos cenários e com uma melhor representação da preferência do consumo em diferentes classes de renda.

A implementação de poluentes atmosféricos no modelo também possibilitaria análises mais interessantes, visto que a premissa sobre poluição local deste trabalho ocorreu de maneira exógena ao modelo e a contabilização destes poluentes possibilitaria a escolha do modelo para quais veículos que podem ser utilizados. E também por existirem diferentes premissas sobre poluição global e local entre os cenários, além de permitir análises de *trade-offs* entre poluição local e global.

Há a necessidade de criação de um modelo satélite que contabilize aspectos comportamentais da sociedade e gere dados de entrada para o modelo BLUES, assim permitindo que este modelo tenha resultados mais próximos da realidade. Este modelo possibilitaria

análises mais refinadas ao se levar em conta a escolha do consumidor, como a preferência por certo energético na cocção de alimentos ou algum veículo menos poluente.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável também devem ser mais investigados, de maneira que possam ser incorporados às análises feitas no modelo, possibilitando um estudo sobre seus possíveis cobenefícios e conflitos no caso brasileiro.

Deve haver um esforço para a ampliação do horizonte de análise do modelo, tornando possível analisar as possíveis repercussões até o ano de 2100 e auxiliando na incorporação dos resultados do modelo TEA.

Por fim, a metodologia desenvolvida neste trabalho pode também ser aplicada a modelos globais, como o COFFEE, facilitando a comunicação deste modelo com o TEA. Além disso, a inserção das tecnologias de eletrificação de transporte permitiria ao modelo COFFEE uma estratégia de descarbonização acelerada, o que poderia reduzir a dependência de tecnologias de combustíveis avançados e de carbono negativo. Assim, seria possível avaliar cenários de longo prazo sem a presença de *overshoot* de emissões de GEE, que pode acarretar em impactos irreversíveis à humanidade, à biodiversidade e ao clima.

Referências Bibliográficas

[1] CUBASCH, U., WUEBBLES, D., CHEN, D., et al. "Introduction". In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, cap. 1, p. 119–158, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013. ISBN: ISBN 978-1-107-66182-0. doi: 10.1017/CBO9781107415324.007.

[2] DA CUNHA, B. S. L. *Desenvolvimento de um modelo global de equilíbrio geral computável para avaliação de políticas climáticas: o papel da mudança de dieta.* Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

[3] IPCC. "Observed changes in climate and their effects". In: *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assess-ment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, cap. 1, Geneva, Switzerland, IPCC, 2007.

[4] NOLAN, R. H., BOER, M. M., COLLINS, L., et al. "Causes and consequences of eastern Australia's 2019-20 season of mega-fires", *Global change biology*, 2020.

[5] LE HOUÉROU, H. N. "Climate change, drought and desertification", *Journal of arid Environments*, v. 34, n. 2, pp. 133–185, 1996.

[6] STRINGER, L. C., DYER, J. C., REED, M. S., et al. "Adaptations to climate change, drought and desertification: local insights to enhance policy in southern Africa", *Environmental science & policy*, v. 12, n. 7, pp. 748–765, 2009.

[7] HIRABAYASHI, Y., MAHENDRAN, R., KOIRALA, S., et al. "Global flood risk under climate change", *Nature Climate Change*, v. 3, n. 9, pp. 816–821, 2013.

[8] FLANNIGAN, M. D., STOCKS, B. J., WOTTON, B. M. "Climate change and forest fires", *Science of the total environment*, v. 262, n. 3, pp. 221–229, 2000.

[9] HOEGH-GULDBERG, O., MUMBY, P. J., HOOTEN, A. J., et al. "Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification", *science*, v. 318, n. 5857, pp. 1737–1742, 2007.

[10] BINDOFF, N. L., WILLEBRAND, J., ARTALE, V., et al. *Observations: oceanic climate change and sea level.* Cambridge, Cambridge University Press, 2007.

[11] NORDHAUS, W. "Evolution of modeling of the economics of global warming: Changes in the DICE model, 1992–2017", *Climatic change*, v. 148, n. 4, pp. 623–640, 2018.

[12] ACKERMAN, F., DECANIO, S. J., HOWARTH, R. B., et al. "Limitations of integrated assessment models of climate change", *Climatic change*, v. 95, n. 3-4, pp. 297–315, 2009.

[13] CONDONI, R., PARK, H.-C., RAMANI, K. *Integrated energy planning: a manual*, v. 2. Cambridge, Asian and Pacific Development Centre, 1985.

[14] BÖHRINGER, C. "The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modeling", *Energy economics*, v. 20, n. 3, pp. 233–248, 1998.

[15] CONNOLLY, D. "Heat Roadmap Europe: Quantitative comparison between the electricity, heating, and cooling sectors for different European countries", *Energy*, v. 139, pp. 580–593, 2017.

[16] ABADIE, F., BOUILLE, D., BRAVO, V., et al. *Manual de Planificacíon Energética.* 2 ed. Avenida Mariscal Antonio José de Sucre N58-63 y Fernández Salvador, Edificio OLADE - Sector San Carlos, Quito - Equador, OLADE, 2017. ISBN: 978-9978-70-109-6.

[17] WEYANT, J. "Some contributions of integrated assessment models of global climate change", *Review of Environmental Economics and Policy*, v. 11, n. 1, pp. 115–137, 2017.

[18] O'NEILL, B. C., KRIEGLER, E., EBI, K. L., et al. "The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century", *Global Environmental Change*, v. 42, pp. 169–180, 2017.

[19] VAN VUUREN, D. P., RIAHI, K., MOSS, R., et al. "A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities", *Global Environmental Change*, v. 22, n. 1, pp. 21–35, 2012.

[20] MOSS, R. H., EDMONDS, J. A., HIBBARD, K. A., et al. "The next generation of scenarios for climate change research and assessment", *Nature*, v. 463, n. 7282, pp. 747, 2010.

[21] O'NEILL, B. C., KRIEGLER, E., RIAHI, K., et al. "A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways", *Climatic change*, v. 122, n. 3, pp. 387–400, 2014.

[22] GOODESS, C., HANSON, C., HULME, M., et al. "Representing climate and extreme weather events in integrated assessment models: a review of existing methods and options for development", *Integrated Assessment*, v. 4, n. 3, pp. 145–171, 2003.

[23] VAN VUUREN, D. P., LOWE, J., STEHFEST, E., et al. "How well do integrated assessment models simulate climate change?" *Climatic change*, v. 104, n. 2, pp. 255–285, 2011.

[24] VAN VUUREN, D. P., STEHFEST, E., GERNAAT, D. E., et al. "Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm", *Global Environmental Change*, v. 42, pp. 237–250, 2017.

[25] ANGELKORTE, G. B. *Modelagem do setor agropecuário dentro de modelo de análise integrada brasileiro*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

[26] ROCHEDO, P. R. R. *Development of a global integrated energy model to evaluate the Brazilian role in climate change mitigation scenarios*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

[27] SELLERS, W. D. "A global climatic model based on the energy balance of the earth-atmosphere system", *Journal of Applied Meteorology*, v. 8, n. 3, pp. 392–400, 1969.

[28] SELLERS, W. D. "A new global climatic model", *Journal of Applied Meteorology*, v. 12, n. 2, pp. 241–254, 1973.

[29] SELLERS, W. D. "A reassessment of the effect of CO2 variations on a simple global climatic model", *Journal of Applied Meteorology*, v. 13, n. 7, pp. 831–833, 1974.

[30] JOUSSAUME, S., TAYLOR, K. "Status of the paleoclimate modeling intercomparison project (PMIP)", *World Meteorological Organization-Publications-WMO TD*, pp. 425–430, 1995.

[31] GANOPOLSKI, A., RAHMSTORF, S. "Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model", *Nature*, v. 409, n. 6817, pp. 153, 2001.

[32] PIERCE, D. W., BARNETT, T. P., SANTER, B. D., et al. "Selecting global climate models for regional climate change studies", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, n. 21, pp. 8441–8446, 2009.

[33] SEMENOV, M. A., STRATONOVITCH, P. "Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts", *Climate research*, v. 41, n. 1, pp. 1–14, 2010.

[34] ROGELJ, J., SHINDELL, D., JIANG, K., et al. "Mitigation Pathways Compatible with 1.5 C in the Context of Sustainable Development. Global Warming of 1.5 C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change". In: *The Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty [V. Masson-Delmotte*, Intergovernmental Panel on Climate Change, World, 2018.

[35] NOBRE, P., SIQUEIRA, L. S., DE ALMEIDA, R. A., et al. "Climate simulation and change in the Brazilian climate model", *Journal of Climate*, v. 26, n. 17, pp. 6716–6732, 2013.

[36] CAPISTRANO, V., FIGUEROA, S., FERNANDEZ, J., et al. "The new surface layer scheme of the Brazilian Earth System Model", *The Surface Ocean-Lower Atmosphere Study (SOLAS), Kiel*, 2015.

[37] VEIGA, S. F., NOBRE, P., GIAROLLA, E., et al. "The Brazilian Earth system model ocean–atmosphere (BESM-OA) version 2.5: evaluation of its CMIP5 historical simulation", *Geoscientific Model Development (Online)*, v. 12, n. 4, 2019.

[38] SANDS, R. D., LEIMBACH, M. "Modeling agriculture and land use in an integrated assessment framework", *Climatic Change*, v. 56, n. 1-2, pp. 185–210, 2003.

[39] ROBINSON, S., MASON-D'CROZ, D., SULSER, T., et al. "The international model for policy analysis of agricultural commodities and trade (IMPACT): model description for version 3", *IFPRI Discussion Paper 1483*, 2015.

[40] HAVLÍK, P., VALIN, H., HERRERO, M., et al. "Climate change mitigation through livestock system transitions", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 10, pp. 3709–3714, 2014.

[41] LOTZE-CAMPEN, H., MÜLLER, C., BONDEAU, A., et al. "Global food demand, productivity growth, and the scarcity of land and water resources: a spatially explicit mathematical programming approach", *Agricultural Economics*, v. 39, n. 3, pp. 325–338, 2008.

[42] SOARES-FILHO, B., LIMA, L., HISSA, L., et al. "OTIMIZAGRO: Uma plataforma integrada de modelagem de uso e mudanças no uso da terra para o Brasil", *Final report. Belo Horizonte (MG): Centro de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Minas Gerais*, 2013.

[43] SOARES-FILHO, B., RAJÃO, R., MERRY, F., et al. "Brazil's market for trading forest certificates", *PLoS One*, v. 11, n. 4, 2016.

[44] HOPE, C. "Critical issues for the calculation of the social cost of CO_2: why the estimates from PAGE09 are higher than those from PAGE2002", *Climatic Change*, v. 117, n. 3, pp. 531–543, 2013.

[45] FUJIMORI, S., HASEGAWA, T., MASUI, T., et al. "SSP3: AIM implementation of shared socioeconomic pathways", *Global Environmental Change*, v. 42, pp. 268–283, 2017.

[46] HADDAD, E. A., DOMINGUES, E. P. "EFES-Um modelo aplicado de equilíbrio geral para a economia brasileira: projeções setoriais para 1999-2004", *Estudos Econômicos (São Paulo)*, v. 31, n. 1, pp. 89–125, 2001.

[47] DOMINGUES, E. P. *Dimensão regional e setorial da integração brasileira na Área de Livre Comércio das Américas.* Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 2002.

[48] VAN VUUREN, D., VAN RUIJVEN, B., HOOGWIJK, M., et al. "TIMER 2: Model description and application". In: A.F. Bouwman, T. K., Goldewijk, K. K. (Eds.), *Integrated modelling of global environmental change. An overview of*

IMAGE, Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP), pp. 39–59, Bilthoven, The Netherlands, 2006.

[49] VAN VUUREN, D. P. *Energy systems and climate policy-long-term scenarios for an uncertain future*. Utrecht University, 2007.

[50] STEHFEST, E., VAN VUUREN, D., BOUWMAN, L., et al. *Integrated assessment of global environmental change with IMAGE 3.0: Model description and policy applications*. Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), 2014.

[51] SCHRATTENHOLZER, L. "The energy supply model MESSAGE". 1981.

[52] HUPPMANN, D., GIDDEN, M., FRICKO, O., 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 & software*, v. 112, pp. 143–156, 2019.

[53] KREY, V., GUO, F., KOLP, P., et al. "Looking under the hood: A comparison of techno-economic assumptions across national and global integrated assessment models", *Energy*, v. 172, pp. 1254–1267, 2019.

[54] MURTY, T. S. "Integrated assessment model for climate change in China", *Natural Hazerds*, 2018.

[55] ROCHEDO, P. R., SOARES-FILHO, B., SCHAEFFER, R., et al. "The threat of political bargaining to climate mitigation in Brazil", *Nature Climate Change*, v. 8, n. 8, pp. 695, 2018.

[56] LUND, H., ARLER, F., ØSTERGAARD, P. A., et al. "Simulation versus optimisation: Theoretical positions in energy system modelling", *Energies*, v. 10, n. 7, pp. 840, 2017.

[57] CUNHA, B. S. L., GARAFFA, R., GURGEL, A. C. *TEA Model documentation*. Working paper, FGV EESP – FGVAGRO, 2020. Disponível em: <`https://hdl.handle.net/10438/28756`>.

[58] PETERSON, G. D., CUMMING, G. S., CARPENTER, S. R. "Scenario planning: a tool for conservation in an uncertain world", *Conservation biology*, v. 17, n. 2, pp. 358–366, 2003.

[59] BRADFIELD, R., WRIGHT, G., BURT, G., et al. "The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning", *Futures*, v. 37, n. 8, pp. 795–812, 2005.

[60] JEFFERSON, M. "Shell scenarios: What really happened in the 1970s and what may be learned for current world prospects", *Technological Forecasting and Social Change*, v. 79, n. 1, pp. 186–197, 2012.

[61] WACK, P. "Scenarios: Shooting the Rapids. Harvard Business Review", *Harvard Business Review*, v. 6, pp. 139–150, 1985.

[62] BURROWS, B. C., MAYNE, A. J., NEWBURY, P. *Into the 21st Century a Handbook for a Sustainable Future*. New York Univ Pr, 1991.

[63] KAPLAN, R. D. "The coming anarchy", *Atlantic monthly*, v. 273, n. 2, pp. 44–76, 1994.

[64] RASKIN, P., BANURI, T., GALLOPIN, G., et al. *Great transition: The promise and lure of the times ahead*. Stockholm Environmental Institute Boston, 2002.

[65] LEGGETT, J., PEPPER, W. J., SWART, R. J., et al. "Emissions scenarios for the IPCC: an update", *Climate change*, pp. 69–95, 1992.

[66] IPCC. *Climate Change: The IPCC 1990 and 1992 Assessments*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 1992.

[67] VAN VUUREN, D. P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., et al. "The representative concentration pathways: an overview", *Climatic change*, v. 109, n. 1-2, pp. 5, 2011.

[68] FUJIMORI, S., ROGELJ, J., KREY, V., et al. "A new generation of emissions scenarios should cover blind spots in the carbon budget space", *Nature Climate Change*, v. 9, n. 11, pp. 798–800, 2019.

[69] SCHNEIDER, S. H. "What is' dangerous' climate change?" *Nature*, v. 411, n. 6833, pp. 17, 2001.

[70] YASUAKI HIJIOKA, Y. M., NISHIMOTO, H. "GLOBAL GHG EMISSION SCENARIOS UNDER GIC; CONCENTRATION STABILIZATION TARGETS", *Journal of global environment engineering*, v. 13, pp. 97–108, 2008.

[71] MIRANDA, P., COELHO, F., TOMÉ, A. R., et al. "20th century Portuguese climate and climate scenarios", *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures—SIAM Project (Santos FD, Forbes K, Moita R, eds). Lisbon: Gradiva Publishers*, pp. 23–83, 2002.

[72] IVERSON, L. R., PRASAD, A. M., MATTHEWS, S. N., et al. "Estimating potential habitat for 134 eastern US tree species under six climate scenarios", *Forest ecology and management*, v. 254, n. 3, pp. 390–406, 2008.

[73] DÖLL, P. "Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment", *Environmental Research Letters*, v. 4, n. 3, pp. 035006, 2009.

[74] NICHOLLS, R. J., WONG, P. P., BURKETT, V., et al. "Climate change and coastal vulnerability assessment: scenarios for integrated assessment", *Sustainability Science*, v. 3, n. 1, pp. 89–102, 2008.

[75] IPCC. *Climate change: The IPCC scientific assessment.* Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990.

[76] HOUGHTON, J. T., MEIRA FILHO, L., BRUCE, J. P., et al. *Climate change 1994: radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC 1992 IS92 emission scenarios.* Cambridge University Press, 1995.

[77] IPCC. *Special Report on Emissions Scenarios.* Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.

[78] MEINSHAUSEN, M., SMITH, S. J., CALVIN, K., et al. "The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300", *Climatic change*, v. 109, n. 1-2, pp. 213, 2011.

[79] IPCC. "Working Group II Impacts, Adaptation and Vulnerability". `https://www.ipcc.ch/working-group/wg2/`, 2020. IPCC. Accessado em: 01/02/2020.

[80] IPCC. "Working Group III Mitigation of Climate Change". `https://www.ipcc.ch/working-group/wg3/`, 2020. IPCC. Accessado em: 01/02/2020.

[81] VAN VUUREN, D. P., KRIEGLER, E., O'NEILL, B. C., et al. "A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architecture", *Climatic Change*, v. 122, n. 3, pp. 373–386, 2014.

[82] LUCENA, A., SCHAEFFER, R., SZKLO, A. S., et al. *Elaboração de Nota Técnica sobre o Nexo Segurança Hídrica, Energética e Alimentar no Brasil em Diálogos com a Sociedade Civil.* Relatório, Banco Interamericano de Desenvolvimento, 2019.

[83] JIANG, L., O'NEILL, B. C. "Global urbanization projections for the Shared Socioeconomic Pathways", *Global Environmental Change*, v. 42, pp. 193–199, 2015.

[84] SAMIR, K., LUTZ, W. "Demographic scenarios by age, sex and education corresponding to the SSP narratives", *Population and Environment*, v. 35, n. 3, pp. 243–260, 2014.

[85] CUARESMA, J. C. "Income projections for climate change research: A framework based on human capital dynamics", *Global Environmental Change*, v. 42, pp. 226–236, 2017.

[86] RAO, N. D., SAUER, P., GIDDEN, M., et al. "Income inequality projections for the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)", *Futures*, v. 105, pp. 27–39, 2019.

[87] LAP, T., BENDERS, R., KÖBERLE, A., et al. "Pathways for a Brazilian biobased economy: towards optimal utilization of biomass", *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 13, n. 3, pp. 673–689, 2019.

[88] SOTERRONI, A. C., RAMOS, F. M., MOSNIER, A., et al. "Expanding the soy moratorium to Brazil's Cerrado", *Science advances*, v. 5, n. 7, 2019.

[89] ARNELL, N. W., LOWE, J. A., BERNIE, D., et al. "The global and regional impacts of climate change under representative concentration pathway forcings and shared socioeconomic pathway socioeconomic scenarios", *Environmental Research Letters*, v. 14, n. 8, pp. 084046, 2019.

[90] RAO, S., KLIMONT, Z., SMITH, S. J., et al. "Future air pollution in the Shared Socio-economic Pathways", *Global Environmental Change*, v. 42, pp. 346–358, 2017.

[91] BAUER, N., CALVIN, K., EMMERLING, J., et al. "Shared socio-economic pathways of the energy sector–quantifying the narratives", *Global Environmental Change*, v. 42, pp. 316–330, 2017.

[92] KÖBERLE, A. C., GARAFFA, R., CUNHA, B. S., et al. "Are conventional energy megaprojects competitive? Suboptimal decisions related to cost overruns in Brazil", *Energy policy*, v. 122, pp. 689–700, 2018.

[93] CUNHA, B., GURGEL, A., GARAFFA, R., et al. "The Opportunity Cost of the Refusal to a Global Dietary Change". In: *IAMC 12th Annual Meeting. Tsukuba, Japan*, 2019.

[94] KOBERLE, A. D. C. *Implementation of land use in an energy system model to study the long term impacts of bioenergy in Brazil and its sensitivity to the choice of agricultural greenhouse gas emission factors*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

[95] VÁSQUEZ-ARROYO, E. M. *Incorporação do nexo energia-água em um modelo de otimização da expansão do sistema energético brasileiro*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

[96] WEI, Y.-M., HAN, R., LIANG, Q.-M., et al. "An integrated assessment of INDCs under Shared Socioeconomic Pathways: an implementation of C 3 IAM", *Natural Hazards*, v. 92, n. 2, pp. 585–618, 2018.

[97] ANDONI, M., ROBU, V., FLYNN, D., et al. "Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 100, pp. 143–174, 2019.

[98] KOSELEVA, N., ROPAITE, G. "Big data in building energy efficiency: understanding of big data and main challenges", *Procedia Engineering*, v. 172, n. 2017, pp. 544–549, 2017.

[99] IRENA. *Renewable Energy Statistics 2019*. Relatório, The International Renewable Energy Agency, 2019.

[100] EPE. *Balanço Energético Nacional 2019: Ano base 2018*. Relatório consolidado, Empresa, de Pesquisa EnergÉtica, 2019.

[101] SIMS, R. E. "Renewable energy: a response to climate change", *Solar energy*, v. 76, n. 1-3, pp. 9–17, 2004.

[102] MAY, R., REITAN, O., BEVANGER, K., et al. "Mitigating wind-turbine induced avian mortality: sensory, aerodynamic and cognitive constraints and options", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, pp. 170–181, 2015.

[103] DOMINKOVIĆ, D. F., BAČEKOVIĆ, I., ĆOSIĆ, B., et al. "Zero carbon energy system of South East Europe in 2050", *Applied energy*, v. 184, pp. 1517–1528, 2016.

[104] PLESSMANN, G., BLECHINGER, P. "Outlook on South-East European power system until 2050: Least-cost decarbonization pathway meeting EU mitigation targets", *Energy*, v. 137, pp. 1041–1053, 2017.

[105] ILAS, A., RALON, P., RODRIGUEZ, A., et al. *Renewable power generation costs in 2017*. Relatório técnico, International Renewable Energy Agency, 2018.

[106] LIU, J., GOLDSTEIN, D. "Understanding China's renewable energy technology exports", *Energy Policy*, v. 52, pp. 417–428, 2013.

[107] STEGEN, K. S. "Heavy rare earths, permanent magnets, and renewable energies: An imminent crisis", *Energy Policy*, v. 79, pp. 1–8, 2015.

[108] TIGAS, K., GIANNAKIDIS, G., MANTZARIS, J., et al. "Wide scale penetration of renewable electricity in the Greek energy system in view of the European decarbonization targets for 2050", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, pp. 158–169, 2015.

[109] BORBA, B. S. M., SZKLO, A., SCHAEFFER, R. "Plug-in hybrid electric vehicles as a way to maximize the integration of variable renewable energy in power systems: The case of wind generation in northeastern Brazil", *Energy*, v. 37, n. 1, pp. 469–481, 2012.

[110] DE JONG, P., KIPERSTOK, A., SÁNCHEZ, A. S., et al. "Integrating large scale wind power into the electricity grid in the Northeast of Brazil", *Energy*, v. 100, pp. 401–415, 2016.

[111] SMIT, H. A. "Guidelines to minimise the impact on birds of Solar Facilities and Associated Infrastructure in South Africa". 2011.

[112] UPTON, J. "Solar Farms Threaten Birds", *Scientific American*, v. 27, 2014.

[113] JENSEN, C. U., PANDURO, T. E., LUNDHEDE, T. H. "The vindication of Don Quixote: The impact of noise and visual pollution from wind turbines", *Land Economics*, v. 90, n. 4, pp. 668–682, 2014.

[114] PIMENTEL DA SILVA, G. D., BRANCO, D. A. C. "Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts", *Impact Assessment and Project Appraisal*, v. 36, n. 5, pp. 390–400, 2018.

[115] DE LUCENA, A. F. P., SZKLO, A. S., SCHAEFFER, R., et al. "The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil", *Energy Policy*, v. 37, n. 3, pp. 879–889, 2009.

[116] SCHAEFFER, R., SZKLO, A., DE LUCENA, A. F. P., et al. "The vulnerable Amazon: the impact of climate change on the untapped potential of hydropower systems", *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 11, n. 3, pp. 22–31, 2013.

[117] PRYOR, S. C., BARTHELMIE, R. "Climate change impacts on wind energy: A review", *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 14, n. 1, pp. 430–437, 2010.

[118] RIAHI, K., VAN VUUREN, D. P., KRIEGLER, E., et al. "The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview", *Global Environmental Change*, v. 42, pp. 153–168, 2017.

[119] ROCHEDO, P. R. R. *Análise econômica sob incerteza da captura de carbono em termoelétricas a carvão: retrofitting e capture-ready*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

[120] GCCSI. *The global status of CCS*. Relatório técnico, Global CCS Institute, 2019.

[121] AGENCY, I. E. *20 Years of Carbon Capture and Storage*. IEA, 2016. doi: https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264267800-en. Disponível em: <`https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264267800-en`>.

[122] GIGNAC, R., MATTHEWS, H. D. "Allocating a 2 C cumulative carbon budget to countries", *Environmental Research Letters*, v. 10, n. 7, pp. 075004, 2015.

[123] OLIVEIRA, C. C. N. D. *POTENCIAL TÉCNICO E ECONÔMICO DA APLICAÇÃO DE ROTAS DE CAPTURA DE CARBONO EM PROCESSOS INDUSTRIAIS BRASILEIROS*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

[124] COSTA, I. *Proposta de Estrutura Regulatória para Sequestro Geológico de CO 2 no Brasil e uma Aplicação para o Estado do Rio de Janeiro*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

[125] DREHER, T., DUGAN, C., HARKIN, T., et al. "Towards large scale CCS", *Energy Procedia*, v. 4, pp. 5549–5556, 2011.

[126] ROCHEDO, P. R., SZKLO, A. "Economic analysis under uncertainty of coal fired capture-ready power plants", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 12, pp. 44–55, 2013.

[127] KRAUSE, R. M., CARLEY, S. R., WARREN, D. C., et al. ""Not in (or under) my backyard": geographic proximity and public acceptance of carbon capture and storage facilities", *Risk Analysis*, v. 34, n. 3, pp. 529–540, 2014.

[128] KRIEGLER, E., LUDERER, G., BAUER, N., et al. "Pathways limiting warming to 1.5° C: a tale of turning around in no time?" *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 376, n. 2119, pp. 20160457, 2018.

[129] HILAIRE, J., MINX, J. C., CALLAGHAN, M. W., et al. "Negative emissions and international climate goals—learning from and about mitigation scenarios", *Climatic Change*, pp. 1–31, 2019.

[130] TOKARSKA, K. B., ZICKFELD, K., ROGELJ, J. "Path independence of carbon budgets when meeting a stringent global mean temperature target after an overshoot", *Earth's Future*, 2019.

[131] IEA. "Global EV Outlook 2019", *International Energy Agency*, 2019. Disponível em: <`www.iea.org/publications/reports/globalevoutlook2019/`>.

[132] NYKVIST, B., NILSSON, M. "Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles", *Nature climate change*, v. 5, n. 4, pp. 329–332, 2015.

[133] BAHN, O., MARCY, M., VAILLANCOURT, K., et al. "Electrification of the Canadian road transportation sector: A 2050 outlook with TIMES-Canada", *Energy Policy*, v. 62, pp. 593–606, 2013.

[134] SINGH, S., JAIN, S., VENKATESWARAN, P., et al. "Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, pp. 623–633, 2015.

[135] AGNOLUCCI, P. "Hydrogen infrastructure for the transport sector", *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 32, n. 15, pp. 3526–3544, 2007.

[136] PUDJIANTO, D., DJAPIC, P., AUNEDI, M., et al. "Smart control for minimizing distribution network reinforcement cost due to electrification", *Energy Policy*, v. 52, pp. 76–84, 2013.

[137] BORBA, B. *Modelagem integrada da introdução de veículos leves conectáveis à rede elétrica no sistema energético brasileiro*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

[138] LARMINIE, J., LOWRY, J. *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons, 2012.

[139] IEA. "Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells", *International Energy Agency*, 2015. Disponível em: <`https://webstore.iea.org/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells`>.

[140] LUTSEY, N., NICHOLAS, M. "Update on electric vehicle costs in the United States through 2030", *Int. Counc. Clean Transp*, pp. 1–12, 2019.

[141] COREN, M. J. "The median electric car in the US is getting cheaper". `https://qz.com/1695602/the-average-electric-vehicle-is-getting-cheaper-in-the-us/`, 2019. Quartz. Accessado em: 18/01/2020.

[142] SHIDORE, N., ICKES, A., WALLNER, T., et al. *Evaluation of ethanol blends for plug-in hybrid vehicles using Engine in the Loop*. Relatório técnico, SAE International, 2012.

[143] IZO, A. "Toyota Corolla híbrido flex será fabricado em São Paulo e chega esse ano". 2019. Disponível em: <`https://glo.bo/39IESXM`>. G1, Auto Esporte. Accessado em: 16/01/2020.

[144] PURNIMA, P., JAYANTI, S. "A high-efficiency, auto-thermal system for on-board hydrogen production for low temperature PEM fuel cells using dual reforming of ethanol", *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 31, pp. 13800–13810, 2016.

[145] SAMPAIO, M. R., ROSA, L. P., MÁRCIO DE ALMEIDA, D., et al. "Ethanol–electric propulsion as a sustainable technological alternative for urban buses in Brazil", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 11, n. 7, pp. 1514–1529, 2007.

[146] SHUQIN, S., YI, W., PEIKANG, S. "Thermodynamic and kinetic considerations for ethanol electrooxidation in direct ethanol fuel cells", *Chinese Journal of Catalysis*, v. 28, n. 9, pp. 752–754, 2007.

[147] THIAM, H., DAUD, W. R. W., KAMARUDIN, S. K., et al. "Overview on nanostructured membrane in fuel cell applications", *International journal of hydrogen energy*, v. 36, n. 4, pp. 3187–3205, 2011.

[148] KAMARUDIN, M., KAMARUDIN, S. K., MASDAR, M., et al. "Direct ethanol fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, n. 22, pp. 9438–9453, 2013.

[149] THOMPSON, S. T., JAMES, B. D., HUYA-KOUADIO, J. M., et al. "Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook", *Journal of Power Sources*, v. 399, pp. 304–313, 2018.

[150] LAJUNEN, A., LIPMAN, T. "Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses", *Energy*, v. 106, pp. 329–342, 2016.

[151] LAJUNEN, A. "Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods", *Journal of cleaner production*, v. 172, pp. 56–67, 2018.

[152] MCCOLLUM, D. L., WILSON, C., PETTIFOR, H., 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, pp. 322–342, 2017.

[153] RAMEA, K., BUNCH, D. S., YANG, C., et al. "Integration of behavioral effects from vehicle choice models into long-term energy systems optimization models", *Energy Economics*, v. 74, pp. 663–676, 2018.

[154] BLANCO, H., VILCHEZ, J. J. G., NIJS, W., et al. "Soft-linking of a behavioral model for transport with energy system cost optimization applied to hydrogen in EU", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 115, pp. 109349, 2019.

[155] CHATTERJEE, K., MA, K.-R. "Time taken for residents to adopt a new public transport service: examining heterogeneity through duration modelling", *Transportation*, v. 36, n. 1, pp. 1–25, 2009.

[156] SZKLO, A., SCHAEFFER, R., DELGADO, F. "Can one say ethanol is a real threat to gasoline?" *Energy Policy*, v. 35, n. 11, pp. 5411–5421, 2007.

[157] KREY, V., RIAHI, K. "Implications of delayed participation and technology failure for the feasibility, costs, and likelihood of staying below temperature targets—Greenhouse gas mitigation scenarios for the 21st century", *Energy Economics*, v. 31, pp. S94–S106, 2009.

[158] AZAR, C., LINDGREN, K., OBERSTEINER, M., et al. "The feasibility of low CO 2 concentration targets and the role of bio-energy with carbon capture and storage (BECCS)", *Climatic Change*, v. 100, n. 1, pp. 195–202, 2010.

[159] TAGOMORI, I. S., CARVALHO, F. M., DA SILVA, F. T., et al. "Designing an optimum carbon capture and transportation network by integrating ethanol distilleries with fossil-fuel processing plants in Brazil", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 68, pp. 112–127, 2018.

[160] DE FRAITURE, C., GIORDANO, M., LIAO, Y. "Biofuels and implications for agricultural water use: blue impacts of green energy", *Water policy*, v. 10, n. S1, pp. 67–81, 2008.

[161] RATHMANN, R., SZKLO, A., SCHAEFFER, R. "Land use competition for production of food and liquid biofuels: An analysis of the arguments in the current debate", *Renewable Energy*, v. 35, n. 1, pp. 14–22, 2010.

[162] ALTIERI, M. A. "The ecological impacts of large-scale agrofuel monoculture production systems in the Americas", *Bulletin of Science, Technology & Society*, v. 29, n. 3, pp. 236–244, 2009.

[163] ALTIERI, M. "Green desserts: Monocultures and their impacts on biodiversity". In: *Red Sugar, Green Deserts*, 1 ed., pp. 67–77, Halmstad, Suécia, FIAN International, 2009.

[164] HÄFELE, W., MANNE, A. S. "Strategies for a transition from fossil to nuclear fuels". 1974.

[165] SUZUKI, A. "An extension of the Häfele-Manne model for assessing strategies for a transition from fossil fuel to nuclear and solar alternatives". 1975.

[166] MESSNER, S., STRUBEGGER, M. *User's Guide for MESSAGE III*. IIASA, 1995.

[167] IAEA. *MESSAGE – User Manual*. International Atomic Energy Agency, 2007.

[168] IAEA. *Brazil: a country profile on sustainable energy development*. International Atomic Energy Agency, 2006.

[169] MALAGUETA, D., SZKLO, A., BORBA, B. S. M. C., et al. "Assessing incentive policies for integrating centralized solar power generation in the Brazilian electric power system", *Energy Policy*, v. 59, pp. 198–212, 2013.

[170] NOGUEIRA, L. P. P., DE LUCENA, A. F. P., RATHMANN, R., et al. "Will thermal power plants with CCS play a role in Brazil's future electric power generation?" *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 24, pp. 115–123, 2014.

[171] ROCHEDO, P., SZKLO, A., LUCENA, A., et al. "How a very detailed representation of energy efficiency options in the objective-function of MESSAGE-Brazil (MSB8000) can affect the penetration of renewables (VRE) into the Brazilian power grid". In: *Integrated Assessment Modelling Conference. Potsdam, Germany*, 2015.

[172] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*. Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[173] HERRERAS-MARTÍNEZ, S., KOBERLE, A., ROCHEDO, P., et al. "Possible energy futures for Brazil and Latin America in conservative and stringent mitigation pathways up to 2050", *Technological Forecasting and Social Change*, v. 98, pp. 186–210, 2015.

[174] LUCENA, A. F. P., SCHAEFFER, R., SZKLO, A. S. "Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system", *Global Environmental Change*, v. 20, n. 2, pp. 342–350, 2010.

[175] LUCENA, A. F., CLARKE, L., SCHAEFFER, R., et al. "Climate policy scenarios in Brazil: A multi-model comparison for energy", *Energy Economics*, v. 56, pp. 564–574, 2016.

[176] PORTUGAL-PEREIRA, J., KÖBERLE, A. C., SORIA, R., et al. "Overlooked impacts of electricity expansion optimisation modelling: The life cycle side of the story", *Energy*, v. 115, pp. 1424 – 1435, 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.062. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216303061>.

[177] LIMA, F., PORTUGAL-PEREIRA, J., LUCENA, A. F., et al. "Analysis of energy security and sustainability in future low carbon scenarios for B razil", *Natural Resources Forum*, v. 39, n. 3-4, pp. 175–190, 2015.

[178] MALAGUETA, D., SZKLO, A., SORIA, R., et al. "Potential and impacts of Concentrated Solar Power (CSP) integration in the Brazilian electric power system", *Renewable Energy*, v. 68, pp. 223 – 235, 2014. doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.050. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114000809>.

[179] ROCHEDO, P. R., COSTA, I. V., IMPÉRIO, M., et al. "Carbon capture potential and costs in Brazil", *Journal of Cleaner Production*, v. 131, pp. 280 – 295, 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.033. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616304887>.

[180] IAMC. "Model Documentation - BLUES - IAMC-Documentation". 2017.

[181] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de transportes.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[182] GONZÁLEZ-MAHECHA, R. E., LUCENA, A. F., SZKLO, A., et al. "Optimization model for evaluating on-site renewable technologies with storage in zero/nearly zero energy buildings", *Energy and Buildings*, v. 172, pp. 505–516, 2018.

[183] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de gestão de resíduos.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[184] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de biocombustíveis.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[185] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de fontes renováveis de geração elétrica.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[186] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de óleo e gás natural.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[187] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de termelétricas e termonucleares.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[188] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Opções transversais para mitigação de emissões de gases de efeito estufa. Captura, transporte e armazenamento de carbono.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[189] BORBA, B. S., LUCENA, A. F., RATHMANN, R., et al. "Energy-related climate change mitigation in Brazil: Potential, abatement costs and associated policies", *Energy Policy*, v. 49, pp. 430–441, 2012.

[190] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de alimentos e bebidas.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[191] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de cimento.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[192] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de cerâmica.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[193] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de ferro-gusa e aço.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[194] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de ferroligas.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[195] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de metalurgia de metais não ferrosos.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[196] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de mineração e pelotização.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[197] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de outras indústrias.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[198] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor químico.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[199] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de papel e celulose.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[200] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor têxtil.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[201] MCTIC. *Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil - Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de edificações.* Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017.

[202] SUGIYAMA, M. "Climate change mitigation and electrification", *Energy Policy*, v. 44, pp. 464–468, 2012.

[203] LECHTENBÖHMER, S., NILSSON, L. J., ÅHMAN, M., et al. "Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification–Implications for future EU electricity demand", *Energy*, v. 115, pp. 1623–1631, 2016.

[204] SCHIFFER, Z. J., MANTHIRAM, K. "Electrification and decarbonization of the chemical industry", *Joule*, v. 1, n. 1, pp. 10–14, 2017.

[205] EPE. *Balanço Energético Nacional 2019: Consumo de Energia por Setor 1970 - 2018.* Relatório consolidado, Empresa, de Pesquisa EnergÉtica, 2019.

[206] WORLDSTEEL. "Steel Statistical Yearbook 2019". 2019.

[207] OLIVEIRA, C. C., ROCHEDO, P. R., BHARDWAJ, R., et al. "Bio-ethylene from sugarcane as a competitiveness strategy for the Brazilian chemical industry", *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2019.

[208] ABSAR, S. M., PRESTON, B. L. "Extending the Shared Socioeconomic Pathways for sub-national impacts, adaptation, and vulnerability studies", *Global Environmental Change*, v. 33, pp. 83–96, 2015.

[209] ANTP. *Sistema de Informações da Mobilidade Urbana - Simob/ANTP.* Relatório geral 2016, Associação Nacional de Transportes Públicos., 2018.

[210] IBGE. *Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da Federação brasileiros com data de referência em 1º de Julho de 2019.* Relatório geral, Ministério da Economia, 2019.

[211] IBGE. "Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua trimestral: Tabela 5918 - População, por grupos de idade". 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5918>. Acessado em: 17 de outubro de 2019.

[212] ANPTRILHOS. *Balanço do setor metroferroviário de passageiros 2013/2014.* Relatório, Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2013.

[213] EDELENBOSCH, O. Y., HOF, A. F., NYKVIST, B., et al. "Transport electrification: the effect of recent battery cost reduction on future emission scenarios", *Climatic change*, v. 151, n. 2, pp. 95–108, 2018.

[214] HOLGADO, M., ALIQUE, D. "Preliminary Equipment Design for On-Board Hydrogen Production by Steam Reforming in Palladium Membrane Reactors", *ChemEngineering*, v. 3, n. 1, pp. 6, 2019.

[215] KAST, J., VIJAYAGOPAL, R., GANGLOFF JR, J. J., et al. "Clean commercial transportation: Medium and heavy duty fuel cell electric trucks", *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 7, pp. 4508–4517, 2017.

[216] BYD. "Class 5 electric truck". https://en.byd.com/wp-content/uploads/2018/07/5f_redesign6-23-18.pdf, 2019. BYD. Accessado em: 10/09/2019.

[217] TANCO, M., CAT, L., GARAT, S. "A break-even analysis for battery electric trucks in Latin America", *Journal of Cleaner Production*, v. 228, pp. 1354–1367, 2019.

[218] GAO, Z., LIN, Z., LACLAIR, T. J., et al. "Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service", *Energy*, v. 122, pp. 588–600, 2017.

[219] ZHAO, H., WANG, Q., FULTON, L., et al. "A comparison of zero-emission highway trucking technologies", *California Digital Library*, 2018.

[220] IEA. "The future of Hydrogen", *International Energy Agency*, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.

[221] BERCKMANS, G., MESSAGIE, M., SMEKENS, J., et al. "Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030", *Energies*, v. 10, n. 9, pp. 1314, 2017.

[222] WAINWRIGHT, S., PETERS, J. *Clean power for transport infrastructure deployment*. Final report, EU publications, 2017.

[223] ABDIN, Z., ZAFARANLOO, A., RAFIEE, A., et al. "Hydrogen as an energy vector", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 120, pp. 109620, 2020.

[224] IEA. "The Future of Trucks", *International Energy Agency*, 2017. Disponível em: <`https://www.iea.org/reports/the-future-of-trucks`>.

[225] KALINCI, Y., HEPBASLI, A., DINCER, I. "Biomass-based hydrogen production: a review and analysis", *International journal of hydrogen energy*, v. 34, n. 21, pp. 8799–8817, 2009.

[226] BALAT, M., BALAT, M. "Political, economic and environmental impacts of biomass-based hydrogen", *International journal of hydrogen energy*, v. 34, n. 9, pp. 3589–3603, 2009.

[227] SMITKOVA, M., JANÍČEK, F., RICCARDI, J. "Life cycle analysis of processes for hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, n. 13, pp. 7844–7851, 2011.

[228] COLELLA, W. G., JAMES, B. D., MOTON, J. M., et al. "Techno-economic analysis of PEM electrolysis for hydrogen production". In: *Electrolytic hydrogen production workshop, NREL, Golden, Colorado*, v. 27, 2014.

[229] MELAINA, M., PENEV, M. "Hydrogen Station Cost Estimates". `https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56412.pdf`, 2013. *National Renewable Energy Laboratory* - NREL.

[230] VAUGHAN, N. E., GOUGH, C., MANDER, S., et al. "Evaluating the use of biomass energy with carbon capture and storage in low emission scenarios", *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 4, pp. 044014, 2018.

[231] DAIGNEAULT, A., JOHNSTON, C., KOROSUO, A., et al. "Developing Detailed Shared Socioeconomic Pathway (SSP) Narratives for the Global Forest Sector", *Journal of Forest Economics*, v. 34, n. 1-2, pp. 7–45, 2019.

[232] BRASIL. "Lei do Marco Civil da Internet no Brasil". 1997. Disponível em: <http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/lei%209.433-1997?OpenDocument>. Acessado em: 20 de janeiro de 2020.

[233] ANA. *Outorga de direito de uso de recursos hídricos, Agência Nacional de Águas.* Relatório técnico, Ministério do Desenvolvimento Regional, 2011.

[234] ANA. *Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil, Agência Nacional de Águas.* Relatório técnico, Ministŕio do Desenvolvimento Regional, 2019.

[235] ORGANIZATION, W. H., OTHERS. *The state of food security and nutrition in the world 2018: building climate resilience for food security and nutrition.* Food & Agriculture Org., 2018.

[236] KRIEGLER, E., BAUER, N., POPP, A., et al. "Fossil-fueled development (SSP5): an energy and resource intensive scenario for the 21st century", *Global environmental change*, v. 42, pp. 297–315, 2017.

[237] WANG, H., LI, N., CHEN, W., et al. "Analysis on carbon emission pathways of global industry sector: sustainability, middle of the road and fossil-fueled development", *Energy Procedia*, v. 142, pp. 2479–2484, 2017.

[238] ZHANG, C.-Y., HAN, R., YU, B., et al. "Accounting process-related CO2 emissions from global cement production under Shared Socioeconomic Pathways", *Journal of cleaner production*, v. 184, pp. 451–465, 2018.

[239] FAIS, B., SABIO, N., STRACHAN, N. "The critical role of the industrial sector in reaching long-term emission reduction, energy efficiency and renewable targets", *Applied Energy*, v. 162, pp. 699–712, 2016.

[240] EIEE. "WITCH model documentation". https://www.witchmodel.org/documentation/, 2020. Accessado em: 16/01/2020.

[241] MITTAL, S., DAI, H., FUJIMORI, S., et al. "Key factors influencing the global passenger transport dynamics using the AIM/transport model", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 55, pp. 373–388, 2017.

[242] DE ANDRADE JUNIOR, M. A. U., VALIN, H., SOTERRONI, A. C., et al. "Exploring future scenarios of ethanol demand in Brazil and their land-use implications", *Energy Policy*, v. 134, pp. 110958, 2019.

[243] LIPSCY, P. Y., SCHIPPER, L. "Energy efficiency in the Japanese transport sector", *Energy Policy*, v. 56, pp. 248–258, 2013.

[244] HANSSON, J., PETTERSSON, F., SVENSSON, H., et al. "Preferences in regional public transport: a literature review", *European Transport Research Review*, v. 11, n. 1, pp. 38, 2019.

[245] SCHAFER, A. "The global demand for motorized mobility", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 32, n. 6, pp. 455–477, 1998.

[246] DE LA BRUHEZE, A. A. "Bicycle use in twentieth century Western Europe: the comparison of nine cities". In: *Proceedings of the Velo Mondial 2000 World Cycling Conference*, 2000.

[247] PUCHER, J., DIJKSTRA, L. "Making walking and cycling safer: lessons from Europe", *Transportation Quarterly*, v. 54, n. 3, pp. 25–50, 2000.

[248] SHAHEEN, S. A., GUZMAN, S., ZHANG, H. "Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia: past, present, and future", *Transportation Research Record*, v. 2143, n. 1, pp. 159–167, 2010.

[249] JAIN, D., TIWARI, G. "How the present would have looked like? Impact of non-motorized transport and public transport infrastructure on travel behavior, energy consumption and CO2 emissions–Delhi, Pune and Patna", *Sustainable Cities and Society*, v. 22, pp. 1–10, 2016.

[250] RIAHI, K., VAN VUUREN, D., KRIEGLER, E., et al. "Integrated Assessment Modeling of Shared Socio Economic Pathways–Study protocol for IAM runs". 2015. Disponível em: <`https://pdfs.semanticscholar.org/4fa1/d91c345a5a430daa0e3de4ef7dc51b447d8a.pdf`>.

[251] GEROLIMINIS, N., DAGANZO, C. F. "A review of green logistics schemes used in cities around the world", *California Digital Library*, 2005.

[252] MA, S.-C., FAN, Y., FENG, L. "An evaluation of government incentives for new energy vehicles in China focusing on vehicle purchasing restrictions", *Energy Policy*, v. 110, pp. 609–618, 2017.

[253] FULTON, L. M., JAFFE, A., MCDONALD, Z. "Internal Combustion Engine Bans and Global Oil Use", *California Digital Library*, 2019.

[254] ZHANG, R., FUJIMORI, S., HANAOKA, T. "The contribution of transport policies to the mitigation potential and cost of 2 C and 1.5 C goals", *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 5, pp. 054008, 2018.

[255] FONTANA, G. "Toyota lança novo Corolla, primeiro carro híbrido flex". 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/carros/carros-eletricos-e-hibridos/noticia/2019/09/03/toyota-lanca-novo-corolla-primeiro-carro-hibrido-flex.ghtml>. G1, Auto Esporte. Accessado em: 16/01/2020.

[256] SUGIMOTO, L. "Unicamp, Nissan e o carro movido com eletricidade gerada por etanol". https://www.unicamp.br/unicamp/noticias/2019/04/26/unicamp-nissan-e-o-carro-movido-com-eletricidade-gerada-por-etanol, 2019. Unicamp Notícias. Accessado em: 16/01/2020.

[257] G1. "Nissan faz nova parceria para desenvolver carros elétricos com etanol no Brasil". 2019. Disponível em: <https://glo.bo/39MbxM4>. G1, Auto Esporte. Accessado em: 16/01/2020.

[258] CORMOS, C.-C., STARR, F., TZIMAS, E., et al. "Innovative concepts for hydrogen production processes based on coal gasification with CO2 capture", *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 33, n. 4, pp. 1286–1294, 2008.

[259] GUO, L., JIN, H. "Boiling coal in water: hydrogen production and power generation system with zero net CO2 emission based on coal and supercritical water gasification", *international journal of hydrogen energy*, v. 38, n. 29, pp. 12953–12967, 2013.

[260] MENDILUCE, M., PÉREZ-ARRIAGA, I., OCAÑA, C. "Comparison of the evolution of energy intensity in Spain and in the EU15. Why is Spain different?" *Energy policy*, v. 38, n. 1, pp. 639–645, 2010.

[261] GOLDEMBERG, J. "The evolution of the energy and carbon intensities of developing countries", *Energy Policy*, p. 111060, 2019.

[262] EPE. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. Relatório, Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2019.

[263] LUEKEN, R., KLIMA, K., GRIFFIN, W. M., et al. "The climate and health effects of a USA switch from coal to gas electricity generation", *Energy*, v. 109, pp. 1160–1166, 2016.

[264] DA SILVA, A. N. R., DE AZEVEDO FILHO, M. A. N., MACÊDO, M. H., et al. "A comparative evaluation of mobility conditions in selected cities of the five Brazilian regions", *Transport Policy*, v. 37, pp. 147–156, 2015.

[265] BRASIL. "Regularização Fundiária Rural". 2017. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13465.htm>. Lei n° 13.465. Acessado em: 07 de fevereiro de 2020.

[266] BRASIL. "Media Provisória n° 910l". 2017. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/Mpv/mpv910.htm>. Acessado em: 07 de fevereiro de 2020.

[267] GUIMARÃES, A., BRITO, M. "Como não resolver a regularização fundiária na Amazônia". https://opiniao.estadao.com.br/noticias/espaco-aberto,como-nao-resolver-a-regularizacao-fundiaria-na-amazonia,70003186845, 2020. G1, Auto Esporte. Accessado em: 07/01/2020.

[268] STRASSBURG, B. B. "Conservation provides multiple wins for Brazil", *Nature ecology & evolution*, v. 3, n. 4, pp. 508–509, 2019.

[269] LEVIS, C., FLORES, B. M., MAZZOCHINI, G. G., et al. "Help restore Brazil's governance of globally important ecosystem services", *Nature Ecology & Evolution*, v. 4, n. 2, pp. 172–173, 2020.

[270] ANDERSON, K., PETERS, G. "The trouble with negative emissions", *Science*, v. 354, n. 6309, pp. 182–183, 2016.

[271] DA SILVA, F. T., CARVALHO, F. M., CORREA JR, J. L. G., et al. "CO2 capture in ethanol distilleries in Brazil: Designing the optimum carbon transportation network by integrating hubs, pipelines and trucks", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 71, pp. 168–183, 2018.

[272] DE CARVALHO, F. M. *Evaluation of the Brazilian Potential for Producing Aviation Biofuels through Consolidated Routes*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

Apêndice A

Premissas qualitativas dos SSPs

SSP element	SSP1			SSP2			SSP3			SSP4			SSP5		
	Country fertility groupings for demographic elements														
	High fert.	Low fert.	Rich-OECD	High fert.	Low fert.	Rich-OECD	High fert.	Low fert.	Rich-OECD	High fert.	Low fert.	Rich-OECD	High fert.	Low fert.	Rich-OECD
Demographics															
Population															
Growth	Relatively low			Medium			High		Low	Relatively high		Low	Relatively low		
Fertility	Low	Low	Med	Medium			High	High	Low	High	Low	Low	Low	Low	High
Mortality	Low			Medium			High			High	Med	Med	Low		
Migration	Medium			Medium						Medium			High		
Urbanization															
Level	High			Medium			Low			High	High	Med	High		
Type	Well managed			Continuation of historical patterns			Poorly managed			Mixed across and within cities			Better mgmt. over time, some sprawl		
Human development															
Education	High			Medium			Low			V.low/uneq.	Low/uneq.	Med/uneq.	High		
Health investments	High			Medium			Low			Unequal within regions, lower in LICs, medium in HICs			High		
Access to health facilities, water, sanitation	High			Medium			Low			Unequal within regions, lower in LICs, medium in HICs			High		
Gender equality	High			Medium			Low			Unequal within regions, lower in LICs, medium in HICs			High		
Equity	High			Medium			Low			Medium			High		
Social cohesion	High			Medium			Low			Low, stratified			High		
Societal participation	High			Medium			Low			Low			High		

Figura A.1: Premissas demográficas e do desenvolvimento humano
Fonte: [18]

SSP element	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Economy & lifestyle					
Growth (per capita)	High in LICs, MICs; medium in HICs	Medium, uneven	Slow	Low in LICs, medium in other countries	High
Inequality	Reduced across and within countries	Uneven moderate reductions across and within countries	High, especially across countries	High, especially within countries	Strongly reduced, especially across countries
International trade	Moderate	Moderate	Strongly constrained	Moderate	High, with regional specialization in production
Globalization	Connected markets, regional production	Semi-open globalized economy	De-globalizing, regional security	Globally connected elites	Strongly globalized, increasingly connected
Consumption & Diet	Low growth in material consumption, low-meat diets, first in HICs	Material-intensive consumption, medium meat consumption	Material-intensive consumption	Elites: high consumption lifestyles; Rest: low consumption, low mobility	Materialism, status consumption, tourism, mobility, meat-rich diets
Policies & institutions					
International Cooperation	Effective	Relatively weak	Weak, uneven	Effective for globally connected economy, not for vulnerable populations	Effective in pursuit of development goals, more limited for envt. goals
Environmental Policy	Improved management of local and global issues; tighter regulation of pollutants	Concern for local pollutants but only moderate success in implementation	Low priority for environmental issues	Focus on local environment in MICs, HICs; little attention to vulnerable areas or global issues	Focus on local environment with obvious benefits to well-being, little concern with global problems
Policy orientation	Toward sustainable development	Weak focus on sustainability	Oriented toward security	Toward the benefit of the political and business elite	Toward development, free markets, human capital
Institutions	Effective at national and international levels	Uneven, modest effectiveness	Weak global institutions/ natl. govts. dominate societal decision-making	Effective for political and business elite, not for rest of society	Increasingly effective, oriented toward fostering competitive markets

Figura A.2: Premissas econômicas, de estilo de vida e políticas públicas e instituições
Fonte: [18]

SSP element	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Technology					
Development	Rapid	Medium, uneven	Slow	Rapid in high-tech economies and sectors; slow in others	Rapid
Transfer	Rapid	Slow	Slow	Little transfer within countries to poorer populations	Rapid
Energy tech change	Directed away from fossil fuels, toward efficiency and renewables	Some investment in renewables but continued reliance on fossil fuels	Slow tech change, directed toward domestic energy sources	Diversified investments including efficiency and low-carbon sources	Directed toward fossil fuels; alternative sources not actively pursued
Carbon intensity	Low	Medium	High in regions with large domestic fossil fuel resources	Low/medium	High
Energy intensity	Low	Uneven, higher in LICs	High	Low/medium	High
Environment & natural resources					
Fossil constraints	Preferences shift away from fossil fuels	No reluctance to use unconventional resources	Unconventional resources for domestic supply	Anticipation of constraints drives up prices with high volatility	None
Environment	Improving conditions over time	Continued degradation	Serious degradation	Highly managed and improved near high/ middle-income living areas, degraded otherwise	Highly engineered approaches, successful management of local issues
Land Use	Strong regulations to avoid environmental tradeoffs	Medium regulations lead to slow decline in the rate of deforestation	Hardly any regulation; continued deforestation due to competition over land and rapid expansion of agriculture	Highly regulated in MICs, HICs; largely unmanaged in LICs leading to tropical deforestation	Medium regulations lead to slow decline in the rate of deforestation
Agriculture	Improvements in ag productivity; rapid diffusion of best practices	Medium pace of tech change in ag sector; entry barriers to ag markets reduced slowly	Low technology development, restricted trade	Ag productivity high for large scale industrial farming, low for small-scale farming	Highly managed, resource-intensive; rapid increase in productivity

Figura A.3: Premissas tecnológicas e sobre o meio ambiente e recursos naturais
Fonte: [18]

Apêndice B

Consolidação das alterações no modelo

A partir dos dados e valores indicados nas seções anteriores, são então criadas as tecnologias e restrições no modelo para o setor de transportes e industrial.

Para realizar as modificações no setor industrial, são criadas 139 restrições para a fração de utilização de energéticos neste setor, além de 12 novas tecnologias de conversão e 14 tecnologias para atender às demandas normalizadas.

Com a desagregação da demanda em tipologias de cidade para o transporte de passageiro faz-se necessário triplicar as tecnologias existentes neste setor, além de adicionar as novas tecnologias de veículos no modelo. Deste modo são produzidas 640 novas tecnologias de veículos no modelo, mais 90 tecnologias que representam as ocupações dos veículos e 450 restrições para a fração de utilização de veículos, modais e demanda por cidade.

No setor de transporte de carga são feitas 90 novas tecnologias de veículos e 190 restrições para fração de utilização de veículos por combustível e na composição de veículos pesados por carga.

Apêndice C

Resultados complementares

C.1 Energia primária

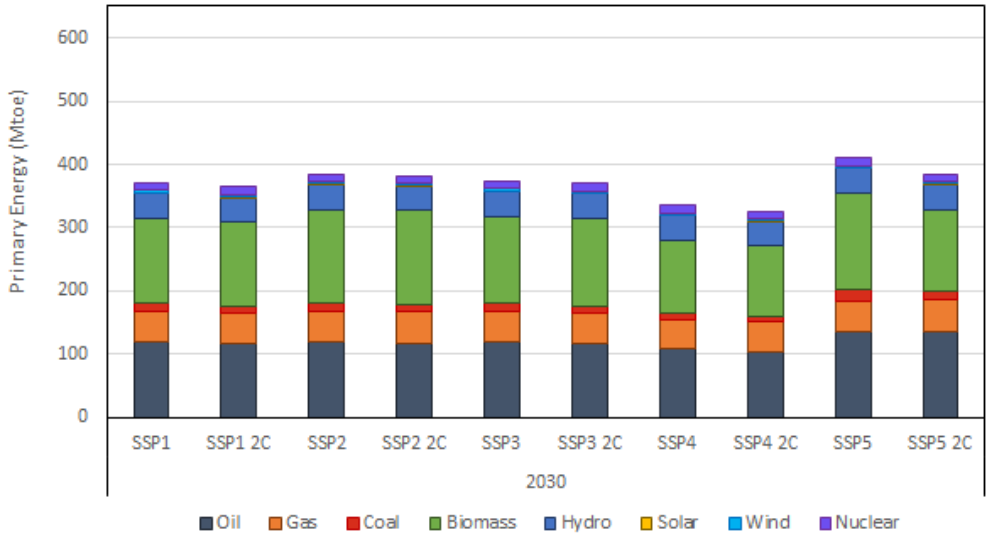


Figura C.1: Energia primária (Mtoe) por cenário em 2030
Fonte: Elaboração própria

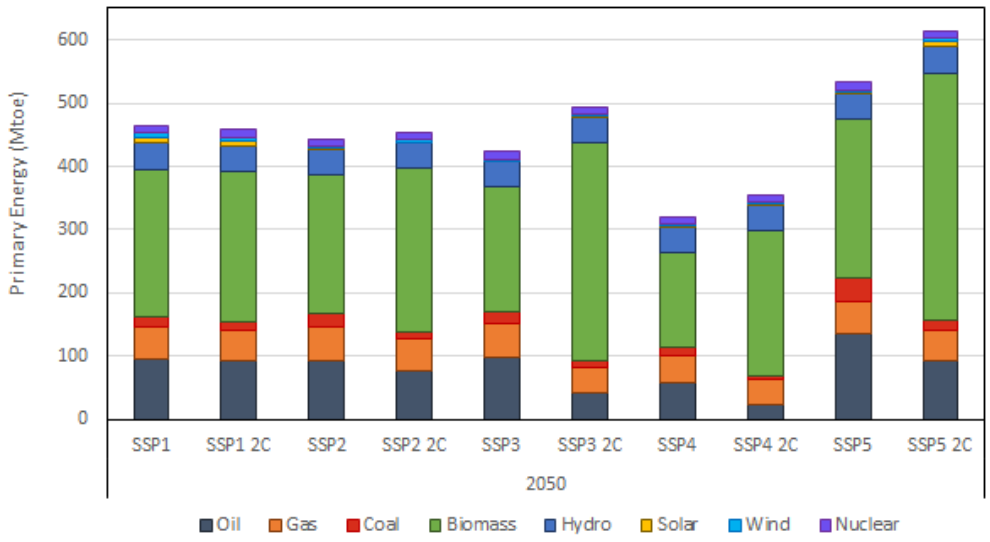


Figura C.2: Energia primária (Mtoe) por cenário em 2050
Fonte: Elaboração própria

C.2 Mitigação setorial

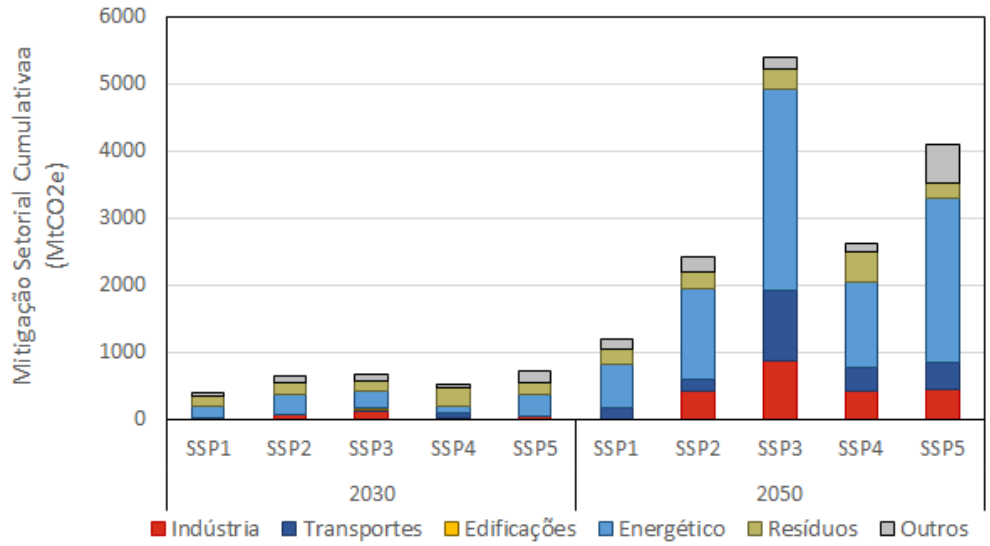


Figura C.3: Mitigação setorial cumulativa ($MtCO_2eq$) nos anos de 2030 e 2050, sem mudanças de uso do solo
Fonte: Elaboração própria

C.3 Consumo industrial

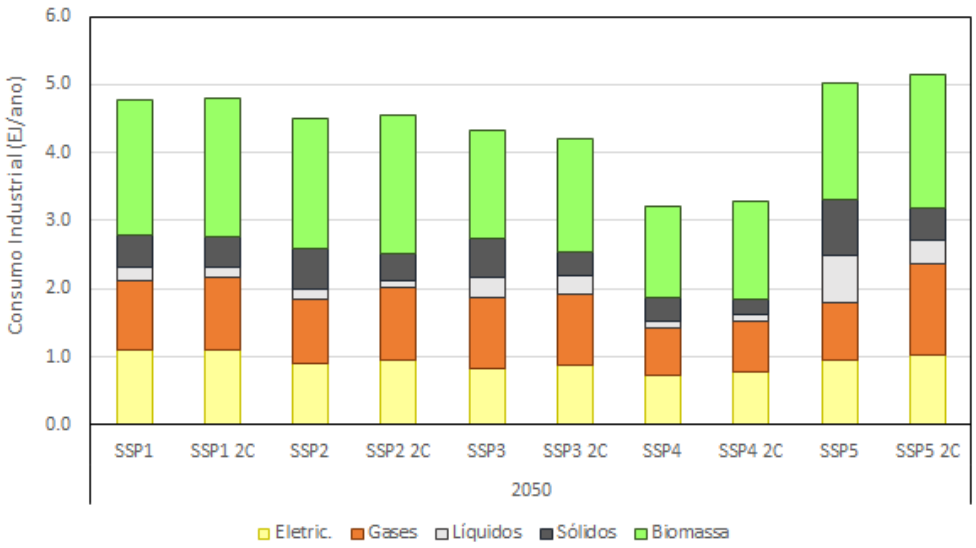


Figura C.4: Consumo industrial (EJ/ano) em 2050 para os cenários analisados
Fonte: Elaboração própria

C.4 Esforço de mitigação

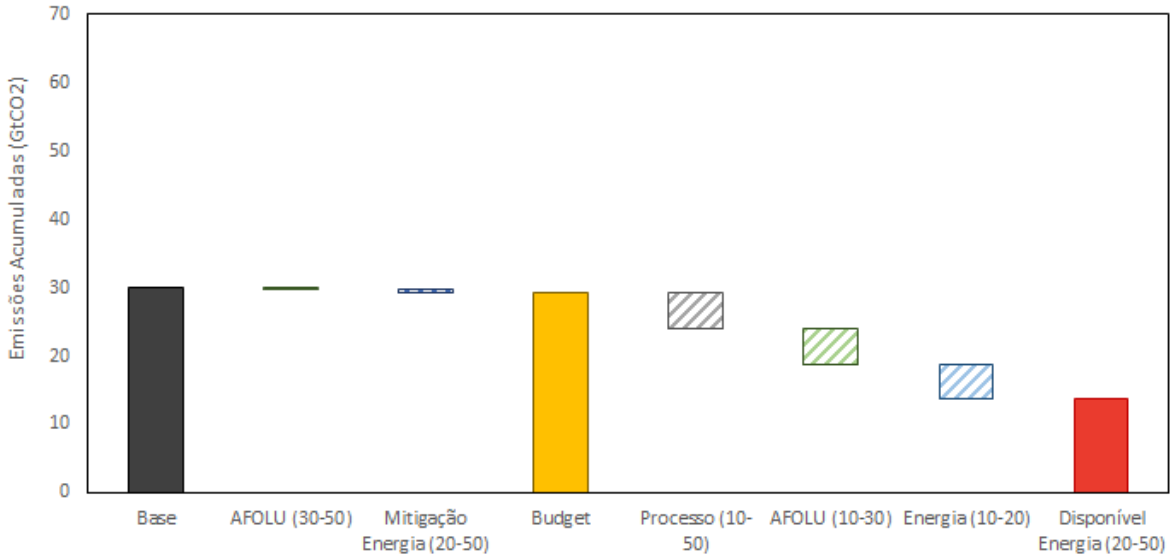


Figura C.5: Emissões acumuladas ($GtCO_2$) no cenário SSP1
Fonte: Elaboração própria

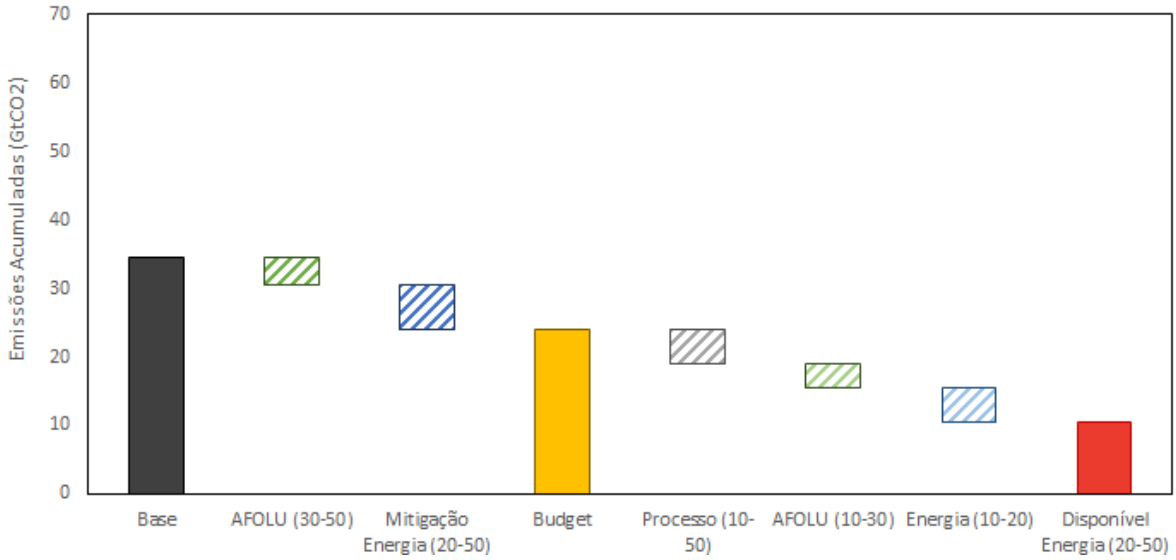


Figura C.6: Emissões acumuladas ($GtCO_2$) no cenário SSP2
Fonte: Elaboração própria

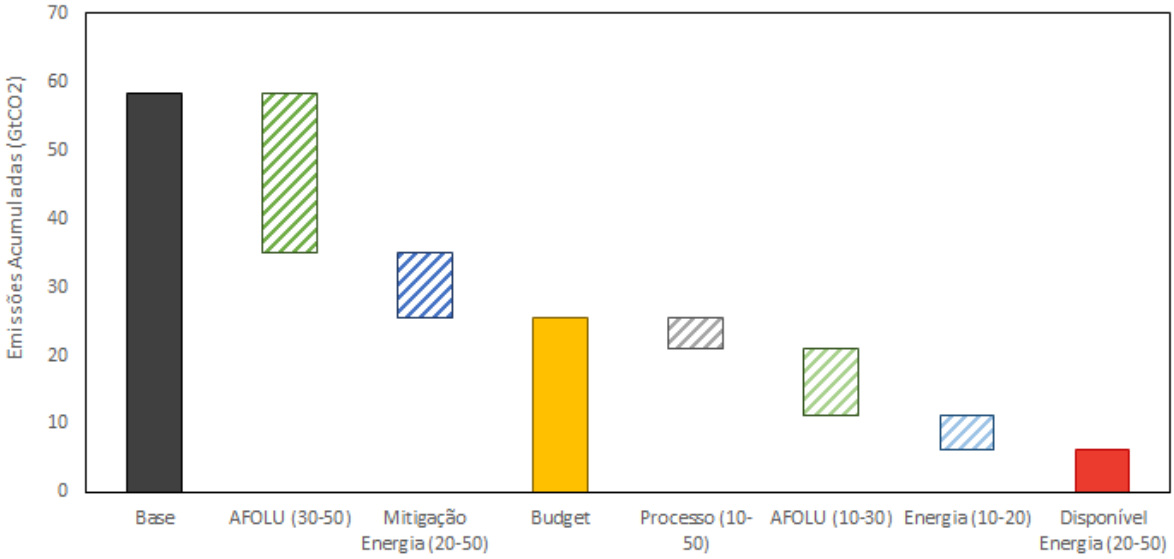


Figura C.7: Emissões acumuladas ($GtCO_2$) no cenário SSP3
Fonte: Elaboração própria

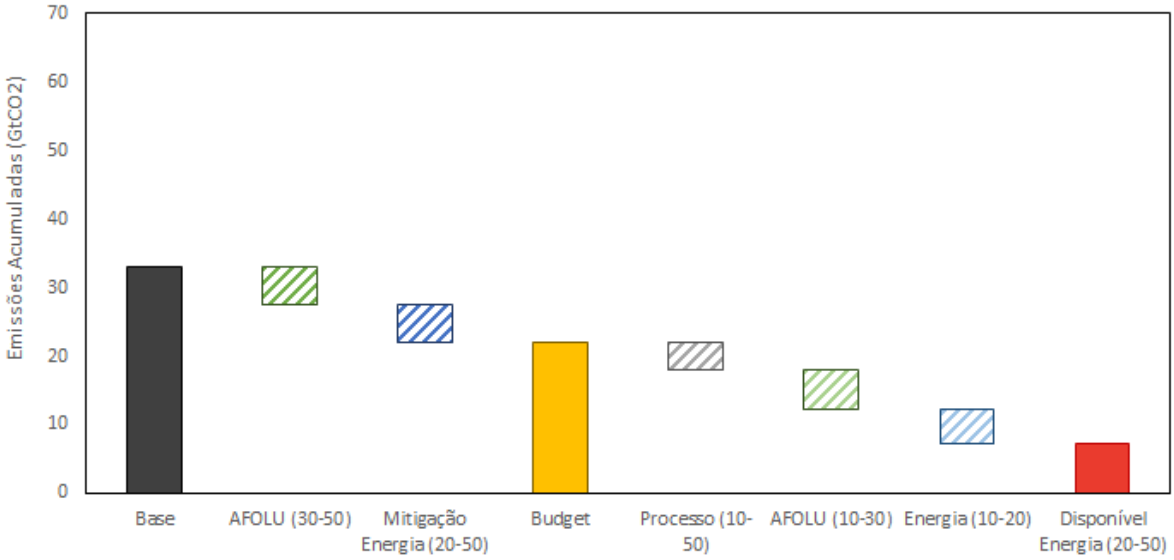


Figura C.8: Emissões acumuladas ($GtCO_2$) no cenário SSP4
Fonte: Elaboração própria