



# Centro Clima

CENTRO DE ESTUDOS INTEGRADOS SOBRE  
MEIO AMBIENTE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

**Preparação de Modelagem para Estimar os Impactos  
Socioeconômicos da Adoção de um Instrumento de Precificação  
de Carbono como parte do Pacote de Implementação da NDC  
Brasileira - Componente 2a (Modelagem)**

**PRODUTO 3 – RELATÓRIO METODOLÓGICO**

Novembro de 2019

**UFRJ**



**UFRJ**  
**CDmC**

**COPPE**  
Programa de Planejamento Energético  
UFRJ

**COPPETEC**  
FUNDAÇÃO



# **Preparação de Modelagem para Estimar os Impactos Socioeconômicos da Adoção de um Instrumento de Precificação de Carbono como parte do Pacote de Implementação da NDC Brasileira - Componente 2a (Modelagem)**

## **DOCUMENTO:**

Produto 3 – Relatório Metodológico

## **COORDENAÇÃO GERAL:**

Emilio Lèbre La Rovere, D.Sc. (CentroClima/COPPE/UFRJ)

## **COORDENAÇÃO EXECUTIVA:**

William Wills, D.Sc. (EOS Consultoria)

## **EQUIPE DE ESPECIALISTAS:**

Marcelo Moreira, D.Sc. (Agroícone)

Carolina Dubeux, D.Sc. (CentroClima/COPPE/UFRJ)

Sérgio Cunha, D.Sc. (CentroClima/COPPE/UFRJ)

Márcio D'Agosto, D.Sc. (PET/COPPE/UFRJ)

Jean-Charles Hourcade, D.Sc. (CIRED)

Gaëlle Le Treut, D.Sc. (CIRED)

Frederic Ghersi, D.Sc. (CIRED)

Tainan Nogueira, M.Sc. (CentroClima/COPPE/UFRJ)

Daniel Schmitz, M.Sc. (PET/COPPE/UFRJ)

Carolina Grotteria, D.Sc. (CentroClima/COPPE/UFRJ)

Otto Hebeda (CentroClima/COPPE/UFRJ)

Gabriel Castro, M.Sc. (CentroClima/COPPE/UFRJ)

Claudio Gesteira, D.Sc. (CentroClima/COPPE/UFRJ)

Giovanna Naspolini, M.Sc. (CentroClima/COPPE/UFRJ)

Gabriela Mota da Cruz, M.Sc. (Agroícone)

Michele Cotta Walter (CentroClima/COPPE/UFRJ)

George Goes, M.Sc. (PET/COPPE/UFRJ)

Julien Lefevre, D.Sc. (CIRED)

Leila Harfuch, D.Sc. (Agroícone)

Mathilde Laurent (CIRED)

Sofia Arantes (Msc, Agroicone)

## **CONSÓRCIO:**





## Sumário

GLOSSÁRIO .....	XI
INTRODUÇÃO .....	1
A - MODELAGEM SETORIAL.....	3
I- AFOLU.....	3
1.    Introdução .....	3
2.    Metodologia .....	6
2.1.    Modelagem Setorial .....	6
2.1.1.    Descrição do modelo .....	6
2.1.2.    Tecnologias/Medidas de mitigação consideradas – Nome das medidas, onde se aplica, breve descrição .....	10
2.1.3.    Apresentação e descrição das principais bases de dados utilizadas (1 parágrafo por base de dados importante para o modelo) .....	15
2.1.4.    Referências bibliográficas.....	17
3.    Descrição da incorporação da proposta do Componente 1 .....	19
3.1.    Modelagem Setorial .....	19
3.1.1.    Descrição da modelagem dos elementos propostos pelo Componente 1 .....	19
4.    Descrição dos resultados a serem informados ao Componente 2B .....	25
4.1.    Modelagem Setorial .....	25
4.1.1.    Dados que serão apresentados .....	25
4.1.2.    Descrição das limitações de modelagem dos elementos propostos pelo Componente 1.....	29
II - Indústria .....	33
1.    Introdução .....	33
2.    Metodologia .....	36
2.1.    Modelagem Setorial.....	37
2.1.1.    Descrição do Modelo.....	38
2.1.1.1.    Emissões de energia.....	38
2.1.1.2.    Emissões de processo e uso de produtos .....	38
2.1.1.2.1.    Emissões de processo da produção de metais.....	38
2.1.1.2.2.    Emissões de processo da produção de alumínio .....	39

2.1.1.2.3. Emissões de processo da produção de cimento .....	40
2.1.1.2.4. Emissões de processo de produtos minerais .....	40
2.1.1.2.5. Emissões de processo da indústria química.....	41
2.1.1.2.6. Emissões de uso de produtos.....	42
2.1.1.2.7. Resumo dos gases a serem inventariados por segmento industrial.....	42
2.1.2. Tecnologias de mitigação consideradas.....	43
2.1.3. Apresentação e descrição das principais bases de dados utilizadas.....	45
2.1.4. Referências bibliográficas .....	47
3. Descrição da incorporação da proposta do componente 1 .....	48
3.1. Descrição da modelagem dos elementos propostos pelo Componente 1 .....	48
4. Descrição dos resultados a serem informados ao Componente 2B .....	52
4.1. Modelos setoriais .....	52
4.1.1. Descrição das limitações de modelagem dos elementos propostos pelo Componente 1.....	52
III - Transportes .....	53
1. Introdução.....	53
2. Metodologia.....	54
2.1 Modelagem Setorial .....	56
2.1.2 Descrição do modelo.....	56
2.1.3 Tecnologias/Medidas de mitigação consideradas .....	59
2.1.4 Apresentação e descrição das principais bases de dados utilizadas.....	62
2.1.5 Referências bibliográficas.....	64
3. Descrição da incorporação da proposta do Componente 1 .....	67
4. Descrição dos resultados a serem informados ao Componente 2B .....	68
IV – Demanda de Energia em Outros Setores (Residencial, Comercial, Público e Agropecuária) .....	69
1. Introdução.....	69
2. Metodologia.....	72
2.1. Modelagem setorial .....	72
2.1.1. Descrição do modelo.....	72
2.1.2. Tecnologias/Medidas de mitigação consideradas .....	78
2.1.3. Apresentação e descrição das principais bases de dados utilizadas.....	78
2.1.4. Referências bibliográficas.....	78

3.	Descrição da incorporação da proposta do Componente 1 .....	78
4.	Descrição dos resultados a serem informados ao Componente 2B .....	78
V-	Oferta de Energia.....	79
1.	Introdução .....	79
5.	Metodologia.....	80
5.1.	Modelagem setorial .....	80
5.1.1.	Descrição do modelo .....	80
5.1.2.	Tecnologias/Medidas de mitigação consideradas .....	83
5.1.3.	Apresentação e descrição das principais bases de dados utilizadas.....	88
5.1.4.	Referências bibliográficas.....	89
6.	Descrição da incorporação da proposta do Componente 1 .....	91
6.1.	Modelagem Setorial .....	91
6.1.1.	Descrição da modelagem dos elementos propostos pelo Componente 1 .....	91
7.	Descrição dos resultados a serem informados ao Componente 2B .....	94
7.1.	Modelos setoriais .....	94
7.1.1.	Descrição das limitações de modelagem dos elementos propostos pelo Componente 1.....	94
VI -	Resíduos.....	95
1.	Introdução .....	95
2.	Metodologia.....	100
2.1	Modelagem Setorial .....	100
2.1.1	Descrição do modelo .....	100
2.1.2	Tecnologias/Medidas de mitigação consideradas .....	100
2.1.3	Apresentação e descrição das principais bases de dados utilizadas.....	101
2.1.4	Referências bibliográficas.....	102
3.	Descrição da incorporação da proposta do Componente 1 .....	104
4.	Descrição dos resultados a serem informados ao Componente 2B .....	104
B -	MODELAGEM TOP-DOWN .....	105
I –	IMACLIM-BR .....	105
1.1	Bases de dados – Calibração para 2015 .....	105
1.2	Características gerais do IMACLIM-BR .....	108
1.3	Atualizações da versão atual do IMACLIM-BR para o projeto PMR.....	111

II – IMACLIM-R (Mundo) .....	112
C – ESTRUTURA DE MODELAGEM INTEGRADA.....	115
D - CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESTRUTURA DE MODELAGEM UTILIZADA.....	122
ANEXO I .....	130

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1.</b>	Dados Macro BLUM.....	15
<b>Tabela 2.</b>	Nível de atividade BLUM .....	16
<b>Tabela 3.</b>	Área BLUM .....	16
<b>Tabela 4.</b>	Abate da pecuária de corte por tipo de animal e nível tecnológico .....	19
<b>Tabela 5.</b>	Participação por tipo de animal acima de 36 meses no abate em nível SIF, por tecnologia	20
<b>Tabela 6.</b>	% abate SIF desagregado por tipo de animal acima de 36 meses, por tecnologia e região BLUM.....	21
<b>Tabela 7.</b>	Descrição da modelagem dos elementos propostos .....	22
<b>Tabela 8.</b>	Níveis de atividade .....	25
<b>Tabela 9.</b>	Área BLUM .....	26
<b>Tabela 10.</b>	Emissões e medidas de mitigação para os diferentes cenários .....	27
<b>Tabela 11.</b>	Emissão e medidas de mitigação nos diferentes setores .....	28
<b>Tabela 12.</b>	Descrição da modelagem dos elementos propostos .....	29
<b>Tabela 13.</b>	Segmentos industriais e suas fontes de emissão.....	36
<b>Tabela 14.</b>	Tabela 2 Fatores de emissão implícitos de gases PFCs na produção de alumínio ....	39
<b>Tabela 15.</b>	produtos da indústria química e suas intensidades de emissão em tCO <sub>2</sub> e/t produto	
	41	
<b>Tabela 16.</b>	Resumo das fontes de emissão e gases de efeito estufa emitidos em cada segmento industrial	42
<b>Tabela 17.</b>	Tipos de medidas de mitigação por fontes de emissão .....	44
<b>Tabela 18.</b>	Medidas de mitigação específicas de certas atividades industriais.....	44
<b>Tabela 19.</b>	PIB industrial e produção dos segmentos industriais em 2005 e 2015 .....	46
<b>Tabela 20.</b>	Descrição dos elementos propostos e como foram modelados.....	49
<b>Tabela 21.</b>	Emissões CO <sub>2</sub> por combustível .....	60
<b>Tabela 22.</b>	Emissões CO <sub>2</sub> por combustível .....	62
<b>Tabela 23.</b>	Comparações de taxas de crescimento 2000-2014 e 2000-2015 .....	73
<b>Tabela 24.</b>	Medidas de mitigação e setores aos quais foram aplicadas.....	88
<b>Tabela 25.</b>	Descrição da modelagem dos elementos propostos[SA1].....	92
<b>Tabela 26.</b>	Dados referentes a Resíduos Sólidos (Mt e %).....	101
<b>Tabela 27.</b>	Dados referentes a Esgotos e Efluentes Industriais (Mt e %) .....	101
<b>Tabela A.1.</b>	Matriz insumo-produto híbrida do modelo IMACLIM .....	131
<b>Tabela A.2.</b>	Tabela das Contas Nacionais do modelo IMACLIM-BR .....	132

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b>	Regiões BLUM .....	7
<b>Figura 2.</b>	Interações entre os produtos e setores no BLUM .....	8
<b>Figura 3.</b>	Emissões da indústria por fonte de emissão entre 2005 e 2015.....	34
<b>Figura 4.</b>	Evolução das Emissões da Indústria por segmento .....	35
<b>Figura 5.</b>	Evolução das Emissões do Setor de Transportes .....	53
<b>Figura 6.</b>	Método para estimativa e projeção das emissões de GEE do setor de transportes ....	55
<b>Figura 7.</b>	Evolução da demanda de energia e da participação da energia elétrica no total dos setores residencial, comercial, público e agropecuário (mil tep e %) .....	69
<b>Figura 8.</b>	Emissões totais dos setores residencial, comercial, público e agropecuário (MtCO <sub>2</sub> e) 70	
<b>Figura 9.</b>	Participação dos setores residencial, comercial, público e agropecuário na emissões totais do País resultantes da queima de combustíveis (%).....	71
<b>Figura 10.</b>	Evolução do consumo de lenha na agropecuária (ktep) .....	74
<b>Figura 11.</b>	Demanda de energia na Agropecuária em relação ao PIB setorial.....	75
<b>Figura 12.</b>	Demanda das principais fontes de energia residencial e possíveis <i>proxies</i> (base 2000)	77
<b>Figura 13.</b>	Emissões do setor energético (2005,2010 e 2015) .....	79
<b>Figura 14.</b>	Diagrama esquemático da cadeia do carvão (exemplo simplificado).....	80
<b>Figura 15.</b>	Variações diurnas e/ou sazonais.....	82
<b>Figura 16.</b>	Geração de Resíduos Sólidos Urbanos (Mt/ano) .....	95
<b>Figura 17.</b>	Destinação de resíduos sólidos no Brasil entre 2005 e 2017 (MT) .....	96
<b>Figura 18.</b>	Carga orgânica total no Brasil de 2005 a 2017 (Mt BOD) .....	97
<b>Figura 19.</b>	Destinação de águas residuais domésticas no Brasil entre 2005 e 2017 (Mt DBO) .	98
<b>Figura 20.</b>	Esquema metodológico do procedimento de hibridização .....	107
<b>Figura 21.</b>	Arquitetura de modelagem .....	109
<b>Figura 22.</b>	.....	114

## GLOSSÁRIO

AFOLU – Agricultura, Florestas e Outros Usos do Solo

BEN – Balanço Energético Nacional

BLUM – Brazilian Land Use Model

BU – Bottom-up

CGE – Modelo de Equilíbrio Geral Computável

CIRED – Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement

COP – Conferência das Partes da UNFCCC

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

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FBMC – Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas

GEE – Gases de Efeito Estufa

INT – Instituto Nacional de Tecnologia

MAC – Curva de custo marginal de abatimento

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

MIT – Massachusetts Institute of Technology

MME – Ministério de Minas e Energia

NDC – Contribuição Nacionalmente Determinada

PET – Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ

PIB – Produto Interno Bruto

PMR – Partnership for Market Readiness

PPE – Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ

TD – Top-down

ToR – Termo de Referência

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNFCCC – Convenção -Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

## INTRODUÇÃO

Na COP 21 em Paris o Brasil se comprometeu em sua NDC a reduzir até 2025 as emissões de GEE em 37% em relação às emissões de 2005. O país apresentou também uma contribuição indicativa de reduzir 43% das emissões até 2030, também em relação a 2005. Para que os objetivos do Acordo de Paris sejam alcançados, as nações terão que descarbonizar suas economias, reduzindo, substituindo ou até mesmo eliminando as atividades econômicas mais intensivas em emissões de gases de efeito estufa (GEE).

A NDC brasileira<sup>1</sup> apresenta em seu anexo várias alternativas para reduzir as emissões de CO2e no país. As medidas ali citadas, dentre outras, podem ser implementadas via políticas de comando e controle ou de precificação de carbono. O projeto PMR prevê a simulação de diferentes cenários de precificação que atinjam as metas estipuladas na NDC, e de um cenário de referência no qual as metas brasileiras também seriam atingidas, mas por meio de políticas de comando e controle que busquem mimetizar as medidas de mitigação que constam no anexo da NDC. Desta forma será possível fazer uma análise comparativa entre os diferentes cenários e identificar qual tipo de política seria mais eficiente para o alcance da NDC. Serão analisados indicadores como PIB, PIB per capita, nível de atividade dos setores, balança comercial, competitividade da economia brasileira, distribuição de renda e outros mais. Segundo a teoria econômica, uma política de precificação proporcionaria ao país o alcance da meta de emissões de forma mais efetiva que uma política de comando e controle.

O ano base escolhido para a elaboração deste estudo foi 2015. Este ano foi escolhido devido à disponibilidade de informações tanto das Contas Nacionais e matriz insumo-produto; do Balanço Energético Nacional, e de estimativas de emissões de GEE do MCTIC e do SEEG. Infelizmente, o Inventário Nacional com ano base 2015 não foi disponibilizado a tempo de ser utilizado neste estudo.

O presente relatório apresenta a metodologia desenvolvida pelo Componente 2A para atender às questões colocadas pelo projeto PMR. É importante enfatizar que no Produto 2 – Revisão de Literatura, produzido pelo Componente 2A, não foi encontrado no mundo nenhum modelo que atendesse todos os requisitos solicitados pelo projeto PMR. Dentre os requisitos solicitados pelo projeto, podemos citar: integração entre modelos setoriais de oferta de energia e de uso do solo e do modelo equilíbrio geral; integração entre o modelo de equilíbrio geral nacional

---

<sup>1</sup> Mais detalhes sobre a NDC brasileira podem ser encontrados em <https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80108/BRASIL%20NDC%20portugues%20FINAL.pdf>

e um modelo de equilíbrio geral mundial; boa desagregação dos setores produtivos e setores institucionais, desagregação das classes de renda, utilização de um modelo CGE dinâmico com apresentação de resultados anuais; apresentação de resultados setoriais e agregados de emissões de GEE; análise dos impactos sobre a competitividade setorial; contabilização da dívida pública e de outros agentes; representação de mudanças estruturais e tecnológicas na economia; representação de detalhes referentes à política de precificação, representação dos instrumentos de política setorial existentes; representação de custos de transação e imperfeições de mercado, dentre vários outros.

Assim, fica claro o desafio metodológico enfrentado pelo Componente 2A na sua tarefa de modelagem e simulação dos 6 cenários de precificação propostos pelo Componente 1, além do cenário de referência (comando e controle) que será a base de comparação dos resultados, e do cenário tendencial (Business as Usual) sobre o qual será inserido a precificação e as medidas de mitigação. Os próximos passos consistem no início das simulações, análise de resultados, e na confecção do relatório final.

O presente relatório está organizado da seguinte forma: A parte A apresenta o detalhamento dos modelos setoriais, a parte B apresenta o detalhamento dos modelos de equilíbrio geral computável, a parte C apresenta a metodologia de integração dos modelos e a parte D faz uma análise crítica da metodologia desenvolvida pelo Componente 2A frente os requisitos do projeto PMR.

## A - MODELAGEM SETORIAL

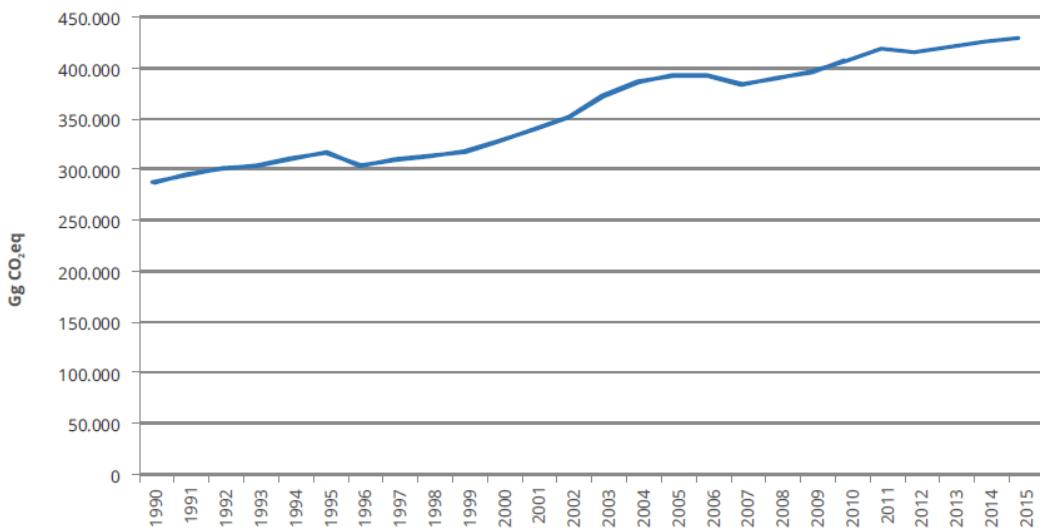
### I - AFOLU

#### 1. Introdução

O Brasil é a 8<sup>a</sup> maior economia mundial (FMI, 2018) com Produto Interno Bruto (PIB) de US\$ 3,24 trilhões e também o 7º maior emissor de gases de efeito estufa (GEE), com 1017,9 MtCO<sub>2</sub>e (Friedrich et al. 2017).

A agricultura e pecuária são atividades econômicas de grande importância no Brasil e que devido à grande extensão de terras agricultáveis e disponíveis para pastagem, ocupa um lugar de destaque no mundo quanto à produção nesse setor. As atividades agropecuárias geram emissões de GEE que ocorrem por diversos processos, como fermentação entérica, manejo de dejetos animais, cultivo de arroz, queima de resíduos agrícolas e emissões de N<sub>2</sub>O provenientes de solos agrícolas.

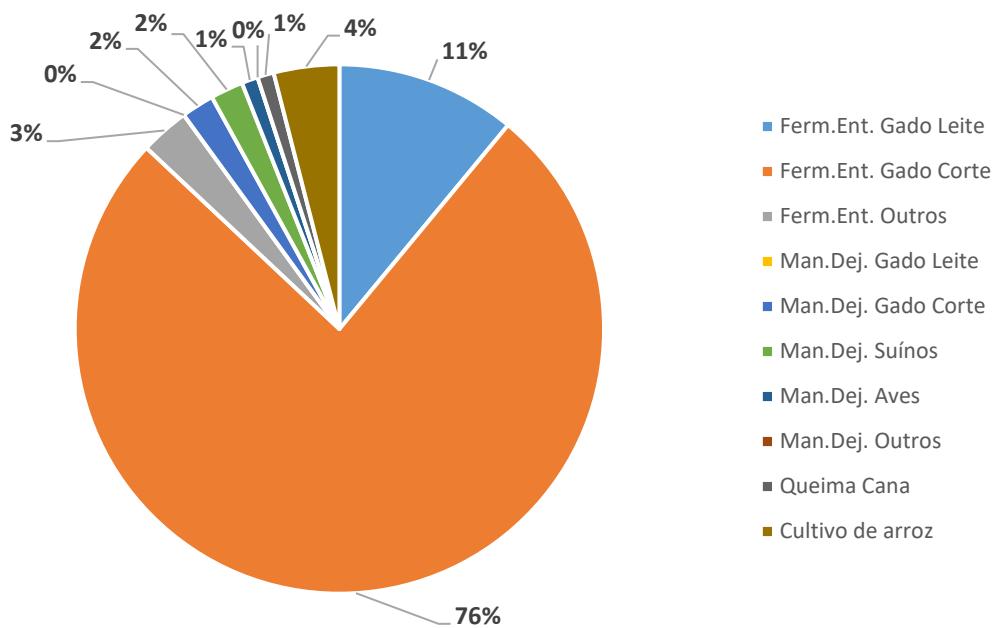
As principais emissões desse setor devem-se à produção de metano por fermentação entérica do gado bovino e à aplicação de adubos e fertilizantes sintéticos com intensa emissão de óxido nitroso. As variações nas emissões no período de 2010-2015 (gráfico 1) refletem, basicamente, em variações nas populações dos rebanhos.



**Gráfico 1.** Evolução das emissões, em CO<sub>2</sub>eq, para o setor Agropecuária

Fonte: MCTI (2017)

A fermentação entérica do gado de corte é a principal fonte de emissão de CH<sub>4</sub>, responsável por 76% das emissões, seguido pela fermentação entérica do gado de leite, responsável por 11% dessas emissões (MCTI, 2017). A quantidade da população de bovinos de corte e leite explica essa diferença de contribuição de emissões. O restante das emissões está relacionado a fermentação entérica de outros animais, ao manejo de dejetos animais, à queima de resíduos agrícolas da cana-de-açúcar e ao cultivo de arroz, totalizando 13% das emissões em 2015 (gráfico 2).

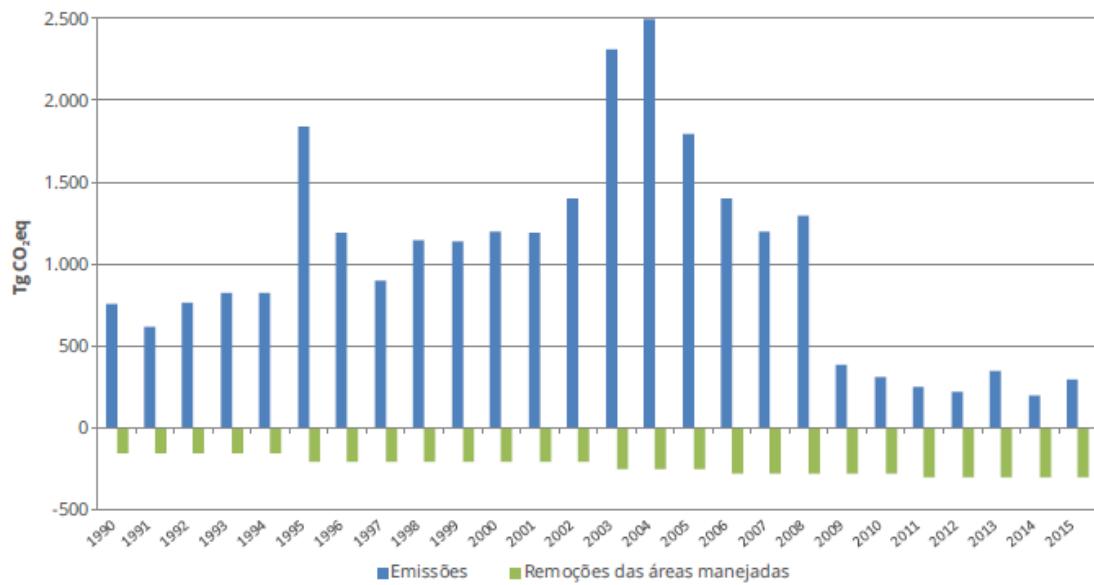


**Gráfico 2.** Setor agropecuária: emissão de CH<sub>4</sub> por subatividade, em 2015  
 Fonte: MCTI (2017)

Em relação à emissão de N<sub>2</sub>O, as emissões diretas dos solos agrícolas – provenientes do esterco dos animais em pastagem, do uso de fertilizantes sintéticos, da aplicação de adubo, da incorporação no solo dos resíduos agrícolas e das áreas de cultivo de solos orgânicos – contribuem com 60% das emissões totais. A maior contribuição identificada dentro das emissões é oriunda dos animais em pastagem, com participação de 34% do total (MCTI, 2017).

Em relação ao setor de Mudança de Uso da Terra, mesmo após uma significativa queda do desmatamento, desde 2005, de 58% e 63% nos biomas Cerrado e Amazônia (INPE, 2018), o Brasil possui 38% das emissões brutas relacionadas a esse setor. Por outro lado, é um setor com importante mitigação de emissões.

As emissões da Mudança de Uso da Terra e Florestas (gráfico 3) são estimadas a partir das remoções de CO<sub>2</sub> (quando há crescimento de vegetação, com a transformação de CO<sub>2</sub> em carbono fixado e liberação de oxigênio, pelo processo de fotossíntese), além das emissões de CO<sub>2</sub> (quando há perda de carbono para a atmosfera, pelo processo de oxidação).



**Gráfico 3.** Emissões brutas e remoções de CO<sub>2</sub> para o Brasil

Fonte: MCTI (2017)

As emissões de CO<sub>2</sub> estão relacionadas, principalmente, ao desmatamento e outras mudanças de uso da terra. Já as remoções são provenientes de reflorestamentos, crescimento de vegetação secundária, bem como de áreas consideradas manejadas. No Brasil, as áreas de floresta e de vegetação nativa não-florestal contidas em Terras Indígenas e no Sistema Nacional de Unidade de Conservação da Natureza são consideradas manejadas, uma vez que têm como objetivo cumprir relevantes funções ecológicas, econômicas e sociais.

O gás predominante neste setor é o CO<sub>2</sub>, mas também ocorrem emissões de outros GEE como o CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O pela queima imperfeita de madeira deixada no campo, no caso de conversão de florestas para outros usos.

## 2. Metodologia

### 2.1. Modelagem Setorial

#### 2.1.1. Descrição do modelo

Para atender as medidas de AFOLU foi utilizado um modelo de equilíbrio parcial, multisetorial e multirregional. O BLUM (*Brazilian Land Use Model*)<sup>2,3</sup> é um modelo econômico de um único país para o setor agropecuário brasileiro, composto por dois módulos: oferta-demanda e uso da terra. O modelo inclui os seguintes produtos: soja, milho (primeira e segunda safras), algodão, arroz, feijão (primeira e segunda safras), cana-de-açúcar, trigo, cevada, pecuária de leite e de corte, carnes bovina, suína e de frango e ovos. Em termos de uso da terra, essas commodities podem ser amplamente classificadas entre terras agrícolas e pastagens, enquanto as florestas comerciais são consideradas como projeções exógenas. Essas atividades são responsáveis por aproximadamente 95% do total da área agrícola brasileira.

No módulo de oferta e demanda, a demanda total por uma atividade é projetada nacionalmente e formada pela demanda doméstica, exportações líquidas (exportações menos importações) e estoques finais (os quais não são considerados para pecuária, carnes e cana-de-açúcar) e respondem a preços e a variáveis exógenas (como PIB, população, taxa de câmbio, entre outras). A oferta é formada pela produção nacional (a qual é projetada regionalmente) e pelos estoques iniciais (novamente considerados apenas para grãos e seus complexos, açúcar e etanol) e respondem às rentabilidades de cada commodity, as quais dependem de custos, preços e produtividades.

A alocação de terra para agricultura e pastagem é calculada para seis regiões geográficas principais (figura 1) de acordo com padrões agrícolas e características da terra, como limites de biomas, relevância especial para conservação, legislação ambiental e dinâmica de uso da terra.

- Sul (estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul);
- Sudeste (estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, e Minas Gerais);
- Centro-Oeste Cerrado (estados de Mato Grosso do Sul, Goiás e parte do estado do Mato Grosso dentro dos biomas Cerrado e Pantanal);
- Norte Amazônia (parte do estado do Mato Grosso dentro do bioma Amazônia, Amazonas, Pará, Acre, Amapá, Rondônia e Roraima);

<sup>2</sup> Harfuch, L., Bachion, L. C., Moreira, M. M. R., Nassar, A. M. & Carriquiry, M. Empirical Findings from Agricultural Expansion and Land Use Change in Brazil. In *Handbook of Bioenergy and Policy* 2, 273-302 (Springer, 2017).

<sup>3</sup> Moreira, M. M. R. Estratégias para expansão do setor sucroenergético e suas contribuições para a NDC Brasileira. 134 (2016).

- Nordeste Litorâneo (Alagoas, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe);
- Nordeste Cerrado (Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia).

Oferta e demanda nacional e o uso da terra regional responde a preços. Consequentemente, para um dado ano, o equilíbrio é obtido quando se encontra um vetor de preços que equilibra todos os mercados simultaneamente. Ano a ano uma sequência de vetores de preços é estimada, permitindo avaliar a trajetória dos mercados ao longo do tempo. Os resultados do modelo são: uso da terra regional, produção nacional e regional, preços, consumo e exportações líquidas. Nesse projeto, o preço do carbono e os limites de emissões são definidos no IMACLIM e inseridas no BLUM. Os níveis de atividade setoriais também são harmonizados. Vide tabelas 8 e 12 para maiores detalhes.



**Figura 1.** Regiões BLUM

Fonte: IBGE e ICONE

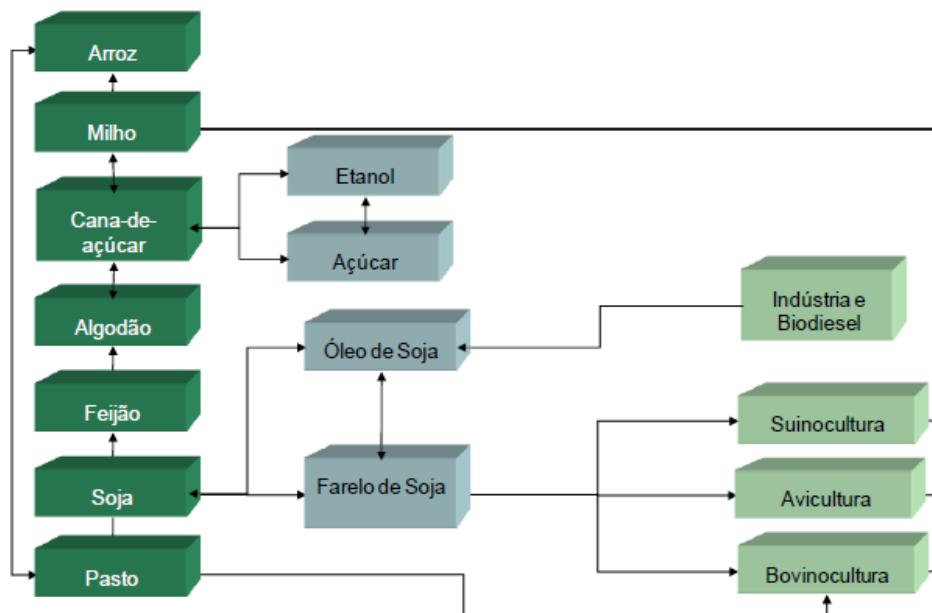
A produção anual em cada região é calculada como o produto da terra e rendimentos agrícolas. A produção nacional é a soma da produção das regiões individuais e os estoques iniciais. Essa relação garante a interação entre o uso da terra e as seções de oferta e demanda do modelo, considerando que a seguinte identidade seja satisfeita:

$$Estoque\;inicial + Produção + Importações = Estoque\;final + Consumo + Exportações$$

ou,

$$\text{Estoque inicial} + \text{Produção} = \text{Estoque final} + \text{Consumo} + \text{Exportações líquidas}$$

O BLUM também considera as interações entre os setores analisados, assim como entre um produto e seus subprodutos. Por exemplo, a relação entre os grãos e a pecuária ocorre a partir do consumo de ração (basicamente milho e farelo de soja) que é função da oferta de carnes, leite e ovos, sendo um componente da demanda doméstica de milho e soja. No caso do complexo de soja, farelo e óleo de soja são parte da demanda doméstica de soja em grão e são determinados pela demanda por esmagamento. Similarmente, açúcar e etanol são componentes da demanda por cana-de-açúcar (Figura 2).



**Figura 2.** Interações entre os produtos e setores no BLUM  
Fonte: ICONE

## Módulo de Uso da Terra

A dinâmica do uso da terra está dividida em dois efeitos: *competição* e *escala*. Intuitivamente, o efeito competição representa como as diferentes atividades agropecuárias competem por uma dada quantidade de terra arável disponível. O efeito escala se refere à maneira pela qual a competição entre as diferentes atividades gera uma necessidade adicional por terra. Esta necessidade é acomodada pela expansão da área total da agropecuária sobre vegetação nativa. A área agrícola total do BLUM (culturas e pastagens) é determinada endogenamente pelo efeito escala.

O efeito competição entre as atividades em cada região é modelado de acordo com a metodologia proposta por Holt (1999), que utiliza um sistema de equações que aloca uma parcela da área agropecuária para cada lavoura e pasto em cada região como função das rentabilidades (própria e das competidoras). Estabelece que, para uma dada quantidade de terra para agropecuária, o aumento na rentabilidade relativa de uma atividade irá resultar em um aumento da participação da área dedicada a esta atividade e reduzir a participação de área de suas competidoras. As condições de regularidade (homogeneidade, simetria e adicionalidade) são impostas de forma que as matrizes de elasticidades (e seus coeficientes associados) são consistentes teoricamente.

Para qualquer conjunto destes coeficientes são calculados os impactos e a competição entre as atividades. Assim, a partir desta estrutura, as simulações realizadas no BLUM nos permitem calcular não apenas alocação de terra, mas também mudanças no uso da terra. Em outras palavras, as condições de regularidade permitem identificar a substituição de área para cada atividade, considerando a quantidade total de área alocada para a agropecuária. Para garantir a coerência das condições acima mencionadas, a área de pastagem é regional e endogenamente determinada, mas considerada como sendo a diferença entre a área total alocada para a agropecuária e a área de lavouras.

Apesar da competição entre as atividades representar a dinâmica das regiões onde a área agrícola é estável e próxima ao potencial arável, esta análise é insuficiente para o Brasil. No caso brasileiro também é necessário analisar a dinâmica das regiões de fronteira agrícola. A história recente da agropecuária brasileira mostra que lavouras, florestas comerciais e pastagens combinadas respondem a incentivos de mercado e contribuem com a expansão da área total alocada para a agropecuária (Moreira et al., 2012). Esse efeito é captado na seção de escala do

BLUM. Este progresso metodológico é essencial para ajustar o modelo às realidades específicas da dinâmica do uso da terra brasileira. O efeito escala se refere às equações que definem como as rentabilidades das atividades determinam a área total alocada para a produção agropecuária. Mais precisamente, a área total alocada para a agropecuária é uma participação da área arável total disponível em cada região, e responde às mudanças na rentabilidade média da agropecuária.

Os efeitos escala e competição não são independentes. Em conjunto, eles são os dois componentes das elasticidades-retorno próprias de cada atividade. Considerando a condição *ceteris paribus* (tudo o mais constante), o aumento na rentabilidade de uma atividade possui três efeitos: aumento na área total alocada para a agropecuária (a partir do retorno médio), aumento na área alocada para esta atividade (aumento de sua participação no total), redução na participação da área das outras atividades.

Ao mesmo tempo, a elasticidade regional do uso da terra (elasticidade-área-retorno total) com relação à rentabilidade média é a soma das elasticidades escala de cada atividade. Assim, as elasticidades de competição podem ser calculadas diretamente após a elasticidade-área total, enquanto as elasticidades próprias (elasticidade-área com relação à rentabilidade da própria atividade) são obtidas a partir de análises econômicas e de revisão de literatura.

O modelo BLUM apresenta alguns diferenciais quando comparado a outros modelos na análise de casos brasileiros: detalhamento regional do perfil tecnológico do setor sucroenergético e capacidade de incorporação de rotas tecnológicas inovadoras; estrutura da demanda de etanol anidro e hidratado; maior detalhamento dos setores agro (i.e., funções de produção); representação endógena dos sistemas de produção de segunda safra; representação de três níveis tecnológicos da pecuária bovina com migração endógena entre sistemas; desenvolvimento de modelo teórico de uso da terra capaz de identificar substituição entre usos (elasticidades substituição e expansão complementares); e, uso de Sistema de Informação Georreferenciada na calibração das elasticidades consideradas na competição e na expansão.

### 2.1.2. Tecnologias/Medidas de mitigação consideradas – Nome das medidas, onde se aplica, breve descrição

#### **Setor de Uso da terra, Mudança de Uso da Terra e Florestas**

As mudanças nos estoques de carbono no setor de mudança de uso da terra e florestas estão associadas a ganhos e perdas de biomassa devido ao desmatamento e outras mudanças no

uso da terra. Emissões de gases de efeito estufa também são emitidas com o uso de calagem na agricultura (emissão de CO<sub>2</sub>) e queima de resíduos florestais (emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>). Por outro lado, o carbono é removido por florestas plantadas, restauração de florestas nativas, recuperação de pastagens degradadas, sistemas pecuário-florestais, áreas protegidas (terras indígenas e unidades de conservação) e florestas secundárias. Uma breve descrição das fontes e remoções de emissão estão listadas abaixo:

### **Fontes de emissão**

#### **a) Desmatamento e outros usos da terra**

Emissão e mitigação de CO<sub>2</sub> ocorrem quando a cobertura da terra muda para um uso da terra com menor ou maior estoque de carbono por hectare. Um exemplo de emissão é a conversão de floresta em pastagem ou agricultura que emite GEE devido à perda de estoques de carbono da retirada da floresta e sua queima. Por outro lado, o crescimento da vegetação remove carbono da atmosfera. A mudança do uso da terra é a principal fonte de emissões de GEE no Brasil. Para estimar a área de desmatamento foi utilizado o Sistema de Estimativa de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2018).

#### **b) Calagem e queima de resíduos florestais**

A queima de biomassa florestal para a produção de lenha e extração de madeira também emitem N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>. Para este estudo, foram utilizados dados exógenos do SEEG (2018) para o período 2005-2017 (La Rovere et al., 2018), não calculados pelo BLUM. Os dados de suporte para a quantidade de calcário usada para corrigir a acidez e melhorar a fertilidade do solo foram estimativas publicadas pelo III Inventário Nacional (Brasil, 2016) e as Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil (MCTI, 2017) para o período 2005-2015.

### **Remoções**

#### **a) Floresta Plantada**

As florestas oferecem grande potencial, em curto prazo, para remoção de CO<sub>2</sub> da atmosfera. Ao contrário de plantas de ciclo de vida curto que morrem e se decompõem rapidamente, as árvores são indivíduos de ciclo de vida longo que acumulam carbono em sua biomassa. O aumento das áreas de floresta plantada captura e armazena grandes quantidade de carbono. Para este estudo foram utilizados dados publicados pela IBÁ (2017) – Indústria Brasileira de Árvores, que

serviram como linha de base para estimar a área de plantio florestal e as remoções de carbono relacionadas.

**b) Restauração de floresta nativa**

O potencial da restauração de floresta nativa também foi estimado para absorção de carbono. A restauração florestal é uma importante ferramenta de mitigação das mudanças climáticas, pois o sequestro de carbono decorre do crescimento das árvores e consequente acúmulo de biomassa. O potencial de mitigação foi calculado considerando os valores de estudo específico preparado para esse projeto<sup>4</sup>.

**c) Recuperação de pastagem degradada**

A recuperação de pastagens degradadas remove CO<sub>2</sub> do solo, melhorando a qualidade das pastagens. Práticas adequadas de manejo, que visam à manutenção ou mesmo acúmulo de carbono no solo-planta podem atenuar os efeitos do aquecimento global via sequestro de carbono no solo a partir do manejo e dinâmica da matéria orgânica no solo. Tal absorção não consta no inventário Brazilíero de emissões por deficiência de dados e fatores de emissão para permanência do carbono no solo. Por outro lado, as principais Tecnologias ABC estão baseadas no sequestro de carbono em solos agrícolas, bem como as NDCs brasileiras<sup>5</sup>. No presente estudo um acumulo de 1 t C/ha.ano, durante 10 anos baseado em estudos anteriores<sup>6</sup>. A quantidade de pastagens recuperadas foi pré-definida em projeto anterior para alguns cenários e é endógeno ao modelo BLUM em outros.

**d) Sistemas de integração floresta-pecuária**

A biomassa florestal e áreas sob sistemas de integração floresta-pecuária potencializam o sequestro de carbono baseado no uso diversificado e eficiente dos recursos pela comunidade de plantas. Os sistemas agrícolas por si só têm a capacidade de reter grandes quantidades de carbono, contudo esse potencial pode ser elevado quando introduzidas árvores ao sistema e criteriosamente gerido em conjunto com culturas e/ou animais. No preente estudo, consideraram-

<sup>4</sup> Relatório Quantificação do potencial de geração de ativos de carbono através de atividades florestais. Way Carbon. 2019.

<sup>5</sup> EMBRAPA - Plataforma ABC. Plataforma multi-institucional de monitoramento de Reduções de Emissões de Gases de Efeito Estufa na agropecuária. Estimativas periódicas. Nota técnincia. Setembro 2018.

<sup>6</sup> Projeto Centro Clima/CBC/FBMC/ICAT, 2019

se valores do terceiro inventário nacional para reflorestamento com eucalipto e variações no estoque de carbono no solo seguindo estudos anteriores<sup>7</sup> e níveis de atividade considerados no projeto Centro Clima/ICAT.

**e) Áreas protegidas e terras indígenas**

O incremento anual de estoques de carbono em áreas protegidas, como unidades de conservação e terras indígenas, é contabilizado no total de remoções de carbono, uma vez que são uma categoria de áreas florestais manejadas no IPCC (2006). Além de estocar enormes quantidades de carbono, as florestas das terras indígenas resfriam a superfície. Foram usadas informações para o período 2010-2017, compiladas da Fundação Nacional do Índio (FUNAI)<sup>8</sup> e Ministério do Meio Ambiente (MMA)<sup>9</sup>.

**f) Floresta secundária**

A floresta secundária em processo de regeneração natural mostra uma substancial recuperação da biomassa e biodiversidade. Também inclui florestas que foram convertidas a outros usos em algum ponto no tempo e que estão em processo de reversão às florestas através de um processo natural ou por ação humana. O incremento anual de carbono nas áreas de floresta secundária também é contabilizado nas remoções. A quantidade de florestas secundárias são calculadas em função das áreas desmatadas e foram definidos no projeto Centro Clima/ICAT.

## **Agricultura**

**a) Pecuária**

**i. Fermentação Entérica**

A fermentação entérica corresponde a uma etapa da digestão dos animais herbívoros ruminantes e é uma das principais fontes de emissão de CH<sub>4</sub> no Brasil. A intensidade desse processo depende de diversos fatores, entre eles, o tipo e animal, alimento utilizado, intensidade de sua atividade física e práticas de criação. O rebanho bovino é o segundo maior emissor no mundo. A fermentação entérica foi calculada endogenamente no BLUM.

---

<sup>7</sup> Projeto IES- Brasil 2050.

<sup>8</sup> [www.funai.com.br](http://www.funai.com.br)

<sup>9</sup> [www.mma.gov.br/cadastro\\_uc](http://www.mma.gov.br/cadastro_uc)

## **ii. Manejo de dejetos de animais**

Os sistemas de manejo de dejetos de animais podem causar emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. A decomposição anaeróbica produz principalmente CH<sub>4</sub>, quando os dejetos são estocados em forma líquida. O manejo de dejetos foi calculado endogenamente no modelo BLUM.

## **iii. Manejo de dejetos de animais (absorção)**

Os sistemas de produção de suínos geram grandes quantidades de dejetos que podem ser tratados convertendo-se matéria orgânica em biogás, que é uma fonte alternativa de energia, para alimentação de geradores de eletricidade. Na contabilização das emissões para manejo de dejetos foi considerado que parte dos dejetos são utilizados para queima de metano, o que gera absorção de GEE desse processo.

## **b) Sistemas de cultivo**

### **i. Solos agrícolas**

A emissão de N<sub>2</sub>O em solos agrícolas decorre da aplicação de fertilizante nitrogenados, tanto de origem sintética quanto animal, e da deposição de dejetos animais em pastagem. Os resíduos vegetais deixados no campo são fontes de emissão de N<sub>2</sub>O e o cultivo de solos orgânicos aumenta a mineralização da matéria orgânica e libera N<sub>2</sub>O. As emissões de solos agrícolas foram contabilizadas endogenamente no BLUM.

### **ii. Cultivo de arroz**

O arroz, quando cultivado em campos inundados ou em áreas de várzea, é uma importante fonte de emissão de CH<sub>4</sub>. Isso ocorre devido à decomposição anaeróbia de matéria orgânica presente na água. No Brasil, porém, a maior parte do arroz é produzida em áreas não inundadas, reduzindo a importância do subsetor nas emissões totais de CH<sub>4</sub>. O cultivo de arroz foi calculado endogenamente no modelo BLUM. As emissões do cultivo de arroz foram calculadas endogenamente no BLUM.

### **iii. Queima de resíduos agrícolas**

A queima de resíduos agrícolas realizada no campo produz CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, CO e NMVOC. O CO<sub>2</sub> emitido não é considerado como uma emissão líquida, devido à realização da fotossíntese,

que absorve a mesma quantidade durante o crescimento das plantas. A queima de resíduos agrícolas foi calculada endogenamente no BLUM.

#### iv. Sistema de plantio direto

O sistema de plantio direto (SPD) é uma técnica de cultivo em que o plantio é efetuado sem as etapas do preparo convencional da aração e da gradagem. Nessa técnica, é necessário manter o solo sempre coberto por plantas em desenvolvimento e por resíduos vegetais. O SPD pode ser considerado como uma modalidade do cultivo mínimo visto que o preparo do solo se limita ao sulco de semeadura, procedendo-se à semeadura, à adubação e, eventualmente, à aplicação de herbicidas em uma única operação. Essa prática é muito utilizada pelos agricultores no cultivo da soja no Brasil.

#### 2.1.3. Apresentação e descrição das principais bases de dados utilizadas

**Tabela 1.** Dados Macro BLUM

	2015
PIB mundo (taxa)	3,8
PIB Brasil (taxa)	-3,8
Taxa de câmbio (R\$/US\$)	3,3
População mundial (bilhão)	7,3
População nacional (milhão)	203
Preço petróleo (US\$/barril)	52,4
Inflação internacional - EUA (%)	0,9
Inflação nacional - IPCA (%)	10,7
Índice preço fertilizante	141,5

Fonte: La Rovere et al (2018), IBGE, FMI, BACEN.

**Tabela 2.** Nível de atividade BLUM

Produção	2015
<b>Variáveis exógenas</b>	
Etanol (milhão de litros)	30.232
Biodiesel (milhão de litros)	3.931
<b>Variáveis endógenas</b>	
Cana-de-açúcar (mil toneladas)	748.636
Cana-de-açúcar - Etanol e açúcar (mil toneladas)	665.586
Soja (mil toneladas)	96.228
Milho (mil toneladas)	30.781
Milho segunda safra (mil toneladas)	53.892
Milho total (mil toneladas)	84.673
Outros grãos (mil toneladas)	25.364
Bovinos (1000 cabeças)	215.199
Suínos (1000 cabeças)	41.866
<b>Carne (1000 toneladas)</b>	26.474
Bovina	9.562
Porco	3.772
Aves	13.140

Fonte: IBGE, CONAB, ABIOVE, ÚNICA, SECEX, CEPEA, ABIEC, FNP, ABPA, Agroicone.

**Tabela 3.** Área BLUM

Área (mil hectares)	2015
<b>Variáveis exógenas</b>	
Floresta Plantada	7.801
Recuperação de pastagem	3.900
iLPF	2.000
Floresta Nativa	-
<b>Variáveis endógenas</b>	
Cana-de-açúcar	10.162
Soja	32.093
Milho (1ª safra)	6.349
Outros grãos (1ª safra)	5.297
Milho (2ª safra)	9.344
<b>Pastagem</b>	177.640
Baixa-tecnologia	79.313
Média-tecnologia	86.956
Alta-tecnologia	11.371

Fonte: IBGE, CONAB, ÚNICA, LAPIG, IBÁ, Agroicone

## Desmatamento

As emissões de desmatamento são calculadas em função da diferença entre as emissões totais do cenário C e as metas para NDC. Avaliações preliminares indicam que tais valores são condizentes com estimativas do período 2010-2917. O mesmo valor será mantido em todos os cenários.

### 2.1.4. Referências bibliográficas

BRASIL (2016). Terceiro inventário de emissões anuais de gases de efeito estufa do Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Brasília: MCTI.

EMBRAPA - Plataforma ABC. Plataforma multi-institucional de monitoramento de Reduções de Emissões de Gases de Efeito Estufa na agropecuária. Estimativas periódicas. Nota técnica. Setembro 2018. <https://www.embrapa.br/meio-ambiente/plataforma-abc>

Friedrich, J., Mengpin, G. and Pickens, A. This interactive chart explains world's top 10 emitters, and how they've changed. World Resources Institute (WRI). 2017. Available at: <https://www.wri.org/blog/2017/04/interactive-chart-explains-worlds-top-10-emitters-and-how-theyve-changed>

Harfuch, L., Bachion, L. C., Moreira, M. M. R., Nassar, A. M. & Carriquiry, M. Empirical Findings from Agricultural Expansion and Land Use Change in Brazil. In Handbook of Bioenergy and Policy 2, 273-302 (Springer, 2017).

Holt, Matthew T. 1999. A linear approximate acreage allocation model. Fargo: Journal of Agricultural and Resource Economics 24 (2):383-397.

Indústria Brasileira de Árvores (IBA). 2017. Relatório 2017. Available in: [https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. COORDENAÇÃO GERAL DE OBSERVAÇÃO DA TERRA. PRODES - Incremento anual de área desmatada no Cerrado Brasileiro. 2018.

INPE - Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite

International Monetary Fund (IMF). World Economic Outlook Database. 2018. Available at: <https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2018/01/weodata/index.aspx>

IPCC (2006). Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use. Disponível em: <http://www.ipcc-nccc.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

La Rovere et al. (2018). IES-Brasil, 2050 - Cenário de Referência e Cenário 1,5°C  
<http://www.centroclima.coppe.ufrj.br/index.php/br/estudos-e-projetos/encerrados/35-2018>

La Rovere et al. (2019). Projeto Centro Clima/CBC/FBMC/ICAT. GHG emissions in Brazil up to 2030 under current mitigation policies – Scenario A and under additional mitigation actions – Scenarios B and C. 2019.

MCTI (2017) Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil.

<http://sirene.mctic.gov.br/portal/opencms/>

Moreira et al. 2012. Direct and indirect land use change assessment. In Sustainability of sugarcane bioenergy, eds. Poppe, M. K.; Cortez, L. A. B. Center for Strategic Studies and Management (CGEE), 2012.

Moreira, M. M. R. Estratégias para expansão do setor sucroenergético e suas contribuições para a NDC Brasileira. 134 (2016).

SEEG (2018). Emissões por setor. Available in: <http://seeg.eco.br/>

Way Carbon (2019). Quantificação do potencial de geração de ativos de carbono através de atividades florestais. Relatório.

### 3. Descrição da incorporação da proposta do Componente 1

#### 3.1. Modelagem Setorial

##### 3.1.1. Descrição da modelagem dos elementos propostos pelo Componente 1

Para simular o efeito de precificação da atividade pecuária no modelo BLUM foi necessário realizar uma adaptação e estratificar a pecuária de corte por tipo de tecnologia, a partir das premissas assumidas neste estudo. Como escopo setorial, foi considerado somente a pecuária de corte, excluindo a atividade leiteira. Como escopo de emissões, foi analisando somente a fermentação entérica, com cálculo dos gases relativo ao metano (CH4).

Para estratificação da pecuária foram utilizadas informações da base de dados Agroicone e IBGE, considerando frigoríficos apenas com inspeção federal e precificação para animais abatidos acima de 36 meses. Para isso, a desagregação do rebanho foi feita de acordo com o tipo de animal (vacas, touros, novilha, novilho, garrote, bezerra, bezerro, boi acima de 36 meses) e tecnologia empregada no BLUM (baixa – 1 a 3@/ha, média – 3 a 6@/ha e alta tecnologia - 6 a 12@/ha). Todos os animais abatidos abaixo de 36 meses foram excluídos da análise.

A participação do abate por tipo de animal, idade e nível tecnológico, foi calculada a partir da base de dados Agroicone, desagregando, primeiramente, todos os animais abatidos em nível nacional e acima de 36 meses (tabela 4).

**Tabela 4.** Abate da pecuária de corte por tipo de animal e nível tecnológico

Tipo de animal /tecnologia	Baixa	Média	Alta
Boi acima de 36 meses	47,8%	23,8%	0%
Touros/Rufiões	3,0%	2,2%	0,4%
Garrote (24 a 36 m)	0%	24,7%	7,4%
Bezerro (12 a 24 m)	0%	0%	46,3%
Bezerra (12 a 24 m)	0%	4,6%	37,3%
Vacas descarte	49,2%	44,7%	8,6%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Fonte: base de dados Agroicone.

O abate da baixa tecnologia está dividido entre boi acima de 36 meses (47,8%), touros (3%) e vacas de descarte (49,2%). Na tecnologia de média, as vendas são, em sua maioria, de vacas de descarte (44,7%), com menor participação de boi acima de 36 meses (23,8%) e maior de garrote

de 24 a 36 meses (24,7%). Para a tecnologia de alta, grande parte das vendas são de bezerros e bezerras de 12 a 24 meses, com 46,3% e 37,3%, respectivamente. Devido ao aumento da tecnologia e maior eficiência produtiva, há uma queda na idade de abate dos animais. As tecnologias de pecuária foram separadas de acordo com a estrutura de abate do BLUM.

Após a desagregação por tipo de animal, tecnologia e idade de abate acima de 36 meses em nível nacional, foi feita a identificação da participação do abate em nível de inspeção federal (SIF) encontrada no IBGE (2019) para bois e vacas (tabela 5), já que a especificação será feita somente para frigoríficos em nível federal.

**Tabela 5.** Participação por tipo de animal acima de 36 meses no abate em nível SIF, por tecnologia

Tipo de animal/tecnologia	Baixa	Média	Alta
<b>Nível SIF</b>			
Boi acima de 36 meses	31,5%	8,1%	0,00%
Touros/Rufões	2,0%	0,8%	0,02%
Vacas descarte	19,2%	17,4%	3,34%
<b>Total</b>	<b>52,7%</b>	<b>26,3%</b>	<b>3,4%</b>

Fonte: base de dados Agroicone e IBGE (2019).

Do total de animais abatidos na baixa tecnologia, 52,7% são em nível SIF e animais acima de 36 meses, sendo 31,5% bois, 2% touros e 19,2% vacas de descarte. A mesma leitura pode ser feita para as outras tecnologias. Além disso, foi necessário estimar o abate formal e informal por tipo de animal. Porém, os dados do IBGE classificam os bois como macho adulto, com 2 anos de idade ou mais. Por isso, a participação do abate nível SIF no abate total, ambos extraídos do IBGE, teve de ser desagregada entre animais abatidos entre 24-36 meses e acima de 36 meses, estes extraídos da base de dados Agroicone.

A série histórica (2010-2018) de abate total por tipo de animal foi extraída da base de dados do IBGE. A partir desses dados, foi estimado o abate formal e informal por tipo de animal. Em 2018, o abate total de bois foi de 21,4 milhões de cabeças. Desses 21 milhões de cabeças, 17 milhões de cabeças foram abates formais e 4 milhões de cabeças informais.

No total de animais abatidos (44,2 milhões de cabeças), 31,9 milhões de cabeças foram abatidas formalmente e 12,3 milhões de cabeças informalmente. O abate informal é uma estimativa realizada pela Agroicone, utilizada para calcular a participação do abate formal e

informal no total de animais abatidos. Em 2018, no total de animais abatidos, 72% foram formais e 28% informais e aproximadamente 80% do abate de bois foi formal e 20% abatidos informalmente.

Em seguida, para estimar a participação do abate SIF desagregado por tipo de animal e região BLUM foi utilizada a mesma lógica da estimativa de abate em nível SIF apresentada anteriormente. A partir dos dados do IBGE foi calculada a participação de cada região em nível SIF, considerando somente o abate formal, desagregado por tipo de animal:

$$= (\text{Tipo Animal SIF REGIÃO}/\text{Tipo Animal Formal REGIÃO}) * (1 - (\text{Abate Informal Tipo Animal REGIÃO}/\text{Abate Total Tipo Animal REGIÃO}))$$

As proporções de abate utilizadas para cada região e introduzidas no BLUM encontram-se na tabela 6 abaixo. Para calcular a participação de cada região em nível SIF, por tipo de animal, tecnologia e abatidos acima de 36 meses foram utilizados os dados de abate do IBGE (2019) e a base de dados Agroicone.

**Tabela 6.** % abate SIF desagregado por tipo de animal acima de 36 meses, por tecnologia e região BLUM

Tipo de animal/tecnologia	Baixa	Média	Alta
<b>Região 1 (R1) - Sul</b>			
Machos +36 meses	20,7%	5,4%	0,01%
Vacas descarte	14,0%	12,7%	2,4%
Total	34,7%	18,1%	2,41%
<b>Região 2 (R2) – Sudeste</b>			
Machos +36 meses	35,0%	9,2%	0,02%
Vacas descarte	21,6%	19,6%	3,7%
Total	56,6%	28,8%	3,72%
<b>Região 3 (R3) – Centro-oeste Cerrado</b>			
Machos +36 meses	37,8%	10,0%	0,02%
Vacas descarte	21,5%	19,5%	3,7%
Total	59,3%	29,5%	3,72%
<b>Região 4 (R4) – Norte Amazônia</b>			
Machos +36 meses	34,4%	9,1%	0,02%
Vacas descarte	20,3%	18,4%	3,5%

Tipo de animal/tecnologia	Baixa	Média	Alta
Total	54,7%	27,5%	3,5%
<b>Região 5 (R5) – Nordeste Litorâneo</b>			
Machos +36 meses	0,0%	0,0%	0,0%
Vacas descarte	0,0%	0,0%	0,0%
Total	0,0%	0,0%	0,0%
<b>REGIÃO 6 (R6) – Nordeste Cerrado</b>			
Machos +36 meses	11,5%	3,1%	0,01%
Vacas descarte	1,1%	1,0%	0,20%
Total	12,6%	4,1%	0,21%

Nota: em machos estão incluídos bois, touros e rufiões

Fonte: IBGE (2019) e dados Agroicone.

Os números apresentados na tabela 6 podem ser interpretados da seguinte forma: de todos os animais abatidos na região 1 em nível SIF, 20,7% são machos acima de 36 meses e 14% vacas de descarte. No total, 34,7% do abate na baixa tecnologia na R1 são animais acima de 36 meses abatidos em nível de inspeção federal.

Ao desagregar o abate nível SIF por região BLUM, os dados podem ser analisados com maior detalhe e proximidade, dando riqueza ao estudo. A partir dos dados do IBGE (2019), a região 5 abate os animais apenas em inspeção estadual e municipal. Com isso, para o objetivo proposto neste estudo, de especificar somente os animais abatidos em inspeção federal, a região 5 não está inserida na especificação da atividade pecuária.

O tratamento dos elementos propostos está detalhado na tabela 7 abaixo, para cada premissa e como foi introduzido na modelagem, destacando se foi feito plenamente, o que foi simplificado/adaptado e as premissas que não foram implementadas no BLUM.

**Tabela 7.** Descrição da modelagem dos elementos propostos

	Premissas	Modelagem	Comentários
<b>Escopo Setorial</b>	Agropecuária – Pecuária de corte	Plenamente	O BLUM possui os principais setores da agropecuária nacional, incluindo a pecuária de corte.
<b>Gases</b>	CH4	Plenamente	Os gases estão separados e calculados de acordo com o Segundo Inventário Nacional (GWP 100 – AR5).
<b>Escopo de emissões</b>	Fermentação entérica da pecuária de corte	Plenamente	O modelo contempla todos os processos que resultam em emissão de GEE, de acordo com o Segundo

	Premissas	Modelagem	Comentários
			Inventário Nacional.
<b>Período</b>	Período inicial de 5 anos	Plenamente	
<b>MRV (PoMuC)</b>	Reporte anual para todos os agentes regulados, com verificação de terceira parte.	Não considerado	Limitação da modelagem.
<b>Limiares de regulação</b>	Frigoríficos: apenas com inspeção federal	Simplificado	Introduzida a participação do abate formal em nível de inspeção federal, no cenário de precificação.
<b>Pontos de regulação</b>	Frigoríficos de bovinos	Simplificado	Não existem frigoríficos no modelo. Para atingir os pontos de regulação, foram feitas ponderações dos dados de entrada.
<b>Instrumento de precificação</b>	Híbrido, Mercado, Tributo, Mercados setoriais.	Simplificado	Não existe diferenciação entre os tipos de instrumento.
<b>Alocação das permissões</b>	Grandfathering/Leilões e Benchmarking/Aprendizado	Simplificado	Somente Grandfathering.
<b>Isenções</b>	Frigoríficos estaduais e municipais.	Simplificado	Somente frigoríficos SIF são tributados.
	Exportações.		Dados de exportação regionais distribuídos por região BLUM. (MAPA)
<b>Proteção à competitividade</b>	Isenção de exportações + ajuste de fronteira para as importações referentes aos setores regulados + na primeira fase: 10% de alocação adicional para setores em risco de competitividade (custo de controle > 10% do custo de produção ou intensidade de comércio > 10% ou combinação >15%); da segunda em diante 10% para setores em alto risco (custo de controle >15% ou intensidade comercial > 15% ou combinação >20%) e 5% para setores em médio risco (10% < c.c. ou i.c. < 15% ou 15% < combinação < 20%); além da proteção de exportações.	Simplificado	Exportações serão isentas. Demais medidas são passíveis de redução do impacto da precificação de maneira homogênea (ponderado por tipo de tecnologia). A verificar durante as rodadas do modelo.
<b>Base de cálculo</b>	A fermentação entérica, medida indiretamente pela combinação da produção de carne e idade do abate, com as práticas produtivas adotadas que afetam essas emissões por idade de abate. Até a idade de abate de 36 meses o nível de emissões para tributo ou mercado seja considerado zero. Para as idades 37-40, 41-48 e acima de 48 a contabilidade das emissões seguiria, para cada intervalo, uma escala com um valor fixo de emissões sobre as quais se aplicariam	Simplificado	Para cálculo de emissões o modelo não contempla a idade de maneira linear. Há somente classes de animais (machos, fêmeas, novos e leiteira) para os quais as idades são estimadas.  Há diferenciação das idades estimadas de acordo com o perfil tecnológico.  Assumimos o valor de 4.67tCO2eq/cabeça abatida acima de 36 meses.

	Premissas	Modelagem	Comentários
	redutores de acordo com a indicadores de emissão da técnica produtiva.		
<b>Valor referencial</b>	R\$ 30 t/CO2e ou preço base	Plenamente	
<b>CAP</b>	Compatível com um preço de R\$ 30/tCO2e da permissão, para tornar comparáveis os cenários ou esforço de redução percentual igual entre os setores regulados, atingindo a redução overall do cenário base.	Simplificado	Em teoria pode ser obedecido. Porém é necessário avaliar a operacionalização durante as rodadas do modelo.
<b>Mecanismos de controle de preços</b>	Fase inicial: preço teto de R\$ 30/tCO2e e preço piso de R\$ 20/tCO2e; Reserva de estabilidade com 10% das permissões a serem vendidas a R\$ 30 em caso de alcance do teto; reserva de novos entrantes com 5% das permissões.	Simplificado	Em teoria pode ser obedecido. Porém sua implementação é complexa. É necessário avaliar a operacionalização durante as rodadas do modelo.  Avaliar consistência com demais modelos setoriais.
<b>Offsets</b>	Offsets nacionais de CRA e de projetos de MDS com MRV certificado, com uso restrito a 20% do montante total por agente regulado.	Simplificado	Possível implementação sendo uma variável exógena ao modelo BLUM. Dados ainda inexistentes.
<b>Penalização</b>	Multa; Possibilidade de aplicação da lei de crime ambiental.	Simplificado	O agente sempre obedece a restrição. Não há otimização entre obedecer ou pagar multa.
<b>Uso das receitas</b>	Redução correspondente da alíquota do INSS (tributo neutro), Compensações fiscais à União e os Estados pelo fim da CIDE combustíveis, Compensações distributivas via BF.	Simplificado	Somente altera a estrutura de demanda por produtos Agro, de acordo com impactos macroeconômicos estimados pelo IMACLIM.

## 4. Descrição dos resultados a serem informados ao Componente 2B

### 4.1. Modelagem Setorial

#### 4.1.1. Dados que serão apresentados

**Tabela 8.** Níveis de atividade

Cenários/ Nível de atividade	2015	Cenário Tendencial (TEN)	Cenário Referencia (REF)	Pacote 'Base' (CPB)	Pacote Distributivo (CPD)	Pacote 'Ajuste de Fronteira' (CAF)	Pacote "Segmenta do" (CPS)	Pacote 'Isenção de Combustíve is Sensíveis' (ICS)	Pacote 'Precificaç ão da Pecuária' (CPP)
<b>Cenário base</b>									
Etanol (milhão de litros)	30.232	EX	EX	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Biodiesel* (milhão de litros)	3.931	EX.	EX.	EX..	EX.	EX.	EX.	EX.	EX.
Cana-de- açúcar (mil ton.)	748.636	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Cana-de- açúcar - Etanol e açúcar (mil ton.)	665.586	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Soja (mil ton.)	96.228	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Milho (mil ton.)	30.781	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Milho 2ª safra (mil ton.)	53.892	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Milho total (mil ton.)	84.673	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Outros grãos (mil ton.)	25.364	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Bovinos (1000 cabeças)	215.199	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Suínos (1000 cabeças)	41.866	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Carne (1000 ton.)	26.474	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Bovina	9.562	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Porco	3.772	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Aves	13.140	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN

Fonte: IBGE, CONAB, ABIOVE, ÚNICA, SECEX, CEPEA, ABIEC, FNP, ABPA, Agroicone.

EX. = variáveis exógenas

EN. = variáveis endógenas

\* A estimativa de demanda por Biodiesel é exógena a modelagem do BLUM, mas endógena ao consórcio de modelagem (modelo de transportes).

**Tabela 9.** Área BLUM

Área (mil hectares)	2030								
	2015	Cenário Tendencial (TEN)	Cenário Referencia (REF)	Pacote 'Base' (CPB)	Pacote Distributivo (CPD)	Pacote 'Ajuste de Fronteira' (CAF)	Pacote "Segmentado" (CPS)	Pacote 'Isenção de Combustíveis Sensíveis' (ICS)	Pacote 'Precificação da Pecuária' (CPP)
Recuperação de Pastagem	3.900	EN.	EX.	EN	EN	EM	EN	EN	EN
iLPF	2.000	EN.	EX.	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Floresta Nativa*	-	EX.	EX.	EX	EX	EX	EX	EX	EX
Floresta Plantada**	7.801	EX.	EX.	EX	EX	EX	EX	EX	EX
Cana-de-açúcar	10.162	EN.	EN.	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Soja	32.093	EN.	EN.	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Milho (1ª safra)	6.349	EN.	EN.	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Outros grãos (1ª safra)	5.297	EN.	EN.	EN	EN	EN	EN	EN	EN
<b>Pastagem</b>	<b>177.640</b>	<b>EN.</b>	<b>EN.</b>	<b>EN</b>	<b>EN</b>	<b>EN</b>	<b>EN</b>	<b>EN</b>	<b>EN</b>
Baixa tec.	79.313	EN.	EN.	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Média tec.	86.956	EN.	EN.	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Alta tec.	11.371	EN.	EN.	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Milho (2ª safra)	9.344	EN.	EN.	EN	EN	EN	EN	EN	EN

Fonte: IBGE, CONAB, ÚNICA, LAPIG, IBÁ, Agroicone

\* Modelagem exógena ao BLUM, entretanto, a modelagem de quantidade de Offsets para os cenários de precificação é endógena ao consórcio de modelagem

\*\*parte exógena (igual a cenário prescritivo) e parcialmente endógeno, determinado pela demanda por biomassa (carvão vegetal e lenha). É exógeno para o BLUM.

**Tabela 10.** Emissões e medidas de mitigação para os diferentes cenários

Agricultura, Floresta e Outros Usos (Mt CO <sub>2</sub> -eq)	2015	Cenário Tendencial (TEN)	Cenário Referencia (REF)	Pacote 'Base' (CPB)	Pacote Distributivo (CPD)	Pacote 'Ajuste de Fronteira' (CAF)	Pacote "Segmenta do" (CPS)	Pacote 'Isenção de Combustíve is Sensíveis' (ICS)	Pacote 'Precificaçã o da Pecuária' (CPP)
<b>LULUCF</b> (Emissões líquidas)	<b>396</b>	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
<b>Emissões brutas</b>	<b>913</b>	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Desmatament o e outras mudanças no uso da terra	883	EX	EX	EX	EX	EX	EX	EX	EX
Calagem e resíduos florestais	30	EX	EX	EX	EX	EX	EX	EX	EX
<b>Remoções</b>	<b>-517</b>	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Floresta Plantada*	-12	EX	EX	EX	EX	EX	EX	EX	EX
Restauração de Floresta Nativa**	0	EX	EX	EX	EX	EX	EX	EX	EX
Recuperação de pastagem	-14	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Sistemas de integração floresta- pecuária*	-43	EN	EX	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Áreas protegidas e terrás indígenas	-354	EX	EX	EX	EX	EX	EX	EX	EX
Floresta Secundária*	-95	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
<b>Agricultura</b>	<b>480</b>	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
<b>Pecuária</b>	<b>343</b>	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Fermentação enteríca	325	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
Manejo de dejetos animais	23	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN

Manejo de dejetos animais (absorção)	-4	EN							
<b>Sistemas de cultivo</b>	<b>136</b>	EN							
Solos agrícolas	130	EN							
Cultivo de arroz	11	EN							
Queima de resíduos agrícolas	2	EN							
Sistema de plantio direto	-6	EN							
<b>Total AFOLU</b>	<b>875</b>	-	-	EN	EN	EN	EN	EN	EN

\*Modelagem de Florestas Plantadas é exógena ao BLUM, mas endógena ao consórcio de modelagem

\*\*Modelagem de Recuperação de Florestas Nativas é exógena ao BLUM, entretanto, a modelagem de quantidade de Offsets para os cenários de precificação é endógena ao consórcio de modelagem

**Tabela 11.** Emissão e medidas de mitigação nos diferentes setores

Tecnologias/Medidas de Mitigação	Sistemas de Cultivo	Pecuária	LULUCF*
<b>Emissões brutas</b>			
Desmatamento e outras mudanças no uso da terra			X
Calagem e resíduos florestais			X
Fermentação entérica		X	
Manejo de dejetos animais		X	
<b>Remoções</b>			
Floresta Plantada			X
Restauração de Floresta Nativa			X
Recuperação de pastagem			X
Sistemas de integração floresta-pecaúria			X
Áreas protegidas e terras indígenas			X
Floresta Secundária			X
Manejo de dejetos animais (absorção)		X	
Solos agrícolas	X		
Cultivo de arroz	X		
Queima de resíduos agrícolas	X		
Sistema de plantio direto	X		

\*LULUCF – Land Use, Land-Use Change and Forestry

Receber dados: PIB, PIB per capita, demanda por produtos agrícolas (delta), preço do petróleo, consumo total combustíveis líquidos de veículos leves e pesados (em energia pois a segregação entre combustível renovável e fóssil será realizada pelo BLUM), offsets (todos cenários), biomassa em hectares.

#### 4.1.2. Descrição das limitações de modelagem dos elementos propostos pelo Componente 1

Para implementar as premissas propostas foi necessário realizar ajustes, devido às limitações da modelagem. A partir do BLUM, alguns elementos foram introduzidos de forma simplificada e outros não foram possíveis de modelar. A descrição das limitações e adaptações da modelagem está apresentada na tabela 12 abaixo:

**Tabela 12.** Descrição da modelagem dos elementos propostos

	Premissas	Modelagem	Comentários
<b>MRV (PoMuC)</b>	Reporte anual para todos os agentes regulados, com verificação de terceira parte.	Não considerado	
<b>Limiares de regulação</b>	Frigoríficos: apenas com inspeção federal	Simplificado	Introduzida a participação do abate formal em nível de inspeção federal, no cenário de precificação.
<b>Pontos de regulação</b>	Frigoríficos de bovinos	Simplificado	Não existem frigoríficos no modelo. Para atingir os pontos de regulação, foram feitas ponderações dos dados de entrada*.
<b>Instrumento de precificação</b>	Híbrido, Mercado, Tributo, Mercados setoriais.	Simplificado	Não existe diferenciação entre os tipos de instrumento.
<b>Alocação das permissões</b>	Grandfathering/ Leilões e Benchmarking/ Aprendizado	Simplificado	Somente Grandfathering.
<b>Isenções</b>	Frigoríficos estaduais e municipais.	Simplificado	Somente frigoríficos SIF são tributados. Dados de exportação regionais distribuídos por região BLUM. (MAPA)
	Exportações.		
<b>Proteção à competitividade</b>	Isenção de exportações + ajuste de fronteira para as importações referentes aos setores regulados + na primeira fase: 10% de alocação adicional para setores em risco de competitividade (custo de controle > 10% do custo de produção ou intensidade de comércio > 10% ou combinação >15%); da segunda em diante 10% para setores em alto risco (custo de controle >15% ou intensidade comercial > 15% ou	Simplificado	Exportações serão isentas. Demais medidas são passíveis de redução do impacto da precificação de maneira homogênea (ponderado por tipo de tecnologia). Proteção dada a nível setorial.

	Premissas	Modelagem	Comentários
	combinação >20%) e 5% para setores em médio risco (10% < c.c. ou i.c. < 15% ou 15% < combinação < 20%); além da proteção de exportações.		
<b>Base de cálculo</b>	A fermentação entérica, medida indiretamente pela combinação da produção de carne e idade do abate, com as práticas produtivas adotadas que afetam essas emissões por idade de abate. Até a idade de abate de 36 meses o nível de emissões para tributo ou mercado seja considerado zero. Para as idades 37-40, 41-48 e acima de 48 a contabilidade das emissões seguiria, para cada intervalo, uma escala com um valor fixo de emissões sobre as quais se aplicariam redutores de acordo com a indicadores de emissão da técnica produtiva.	Simplificado	<p>Para cálculo de emissões o modelo não contempla a idade de maneira linear. Há Somente classes de animais (machos, fêmeas, novos e leiteira) para os quais as idades são estimadas.</p> <p>Há diferenciação das idades estimadas de acordo com o perfil tecnológico.</p> <p>Assumimos o valor correspondente a 36 ou 48 meses nas análises iniciais..</p>
<b>CAP</b>	Compatível com um preço de R\$ 30/tCO2e da permissão, para tornar comparáveis os cenários ou esforço de redução percentual igual entre os setores regulados, atingindo a redução overall do cenário base.	Simplificado	Em teoria pode ser obedecido. Porém é necessário avaliar a operacionalização durante as rodadas do modelo.
<b>Mecanismos de controle de preços</b>	Fase inicial: preço teto de R\$ 30/tCO2e e preço piso de R\$ 20/tCO2e; Reserva de estabilidade com 10% das permissões a serem vendidas a R\$ 30 em caso de alcance do teto; reserva de novos entrantes com 5% das permissões.	Simplificado	Em teoria pode ser obedecido. Porém sua implementação é complexa. É necessário avaliar a operacionalização durante as rodadas do modelo.  Avaliar consistência com demais modelos setoriais.
<b>Offsets</b>	Offsets nacionais de CRA e de projetos de MDS com MRV certificado, com uso restrito a 20% do montante total por agente regulado. Da segunda fase em diante, tal limite cairia para 10%.	Simplificado	Possível implementação sendo uma variável exógena ao modelo BLUM. Dados ainda inexistentes.
<b>Penalização</b>	Multa; Possibilidade de aplicação da lei de crime ambiental.	Simplificado	O agente sempre obedece a restrição. Não há otimização entre obedecer ou pagar multa.
<b>Uso das receitas</b>	Redução correspondente da alíquota do INSS (tributo neutro), Compensações fiscais à União e os Estados pelo fim da CIDE combustíveis, Compensações distributivas via BF.	Simplificado	Somente altera a estrutura de demanda por produtos Agro, de acordo com impactos macroeconômicos estimados pelo IMACLIM.

\* mesma ponderação que foi aplicada para atender aos limiares de regulação

### Anexo I: Metodologia BLUM para consumo de combustíveis Ciclo Otto

O equacionamento do consumo interno de etanol é mais complexo e merece atenção especial. A versão atual do modelo BLUM foi aprimorada refletindo a estrutura desenvolvida para Babcock et al. (2013). Primeiro projeta-se a frota de veículos leves e sua estrutura em função da frota inicial, das vendas (função do PIB per capita), de curvas de sucateamento (*depr*) e das preferências do consumidor entre carros *flex*, gasolina, etanol ou elétricos.

Para efeitos de simplificação a modelagem de demanda de etanol não considera veículos elétricos (que não consomem combustíveis líquidos), motos e o consumo de Gás Natural Veicular (GNV). Obtém-se assim as seguintes equações para frota Otto total ( $Frota_{otto}$ ), frota movida à gasolina C ( $Frota_{gas}$ ), frota de veículos flex ( $Frota_{flex}$ ) e frota movida apenas a etanol hidratado ( $Frota_{hidr}$ ).

$$Fleet_{otto,t} = f(Fleet_{t0}, GDP, POP, pref, depr) \quad (1)$$

e

$$Fleet_{otto} = Fleet_{gas} + Fleet_{flex} + Fleet_{alco} \quad (2)$$

Assume-se que todos os veículos têm um nível de consumo igual ( $Cons_{veic}$ ), que é função do nível de atividade da economia, ganhos de eficiência (*efic*) e preços dos combustíveis ( $P_{fuel}$ ). Mudanças no padrão de consumo (i.e., transferência de modais, entre outros) não são modelados, mas podem ser inseridos exogenamente.

$$Cons_{vefic} = f(GDP, efic, P_{fuel}) \quad (3)$$

A frota flex consome gasolina ( $Share_{gas}$ ) e etanol ( $Share_{eth}$ ), e as parcelas são função dos preços relativos observados pelo consumidor, de modo que:

$$Share_{gas} = f\left(\frac{P_{cons_{gas}}}{P_{cons_{eth}}}\right) \quad (4)$$

e

$$\text{Share}_{eth} = (1 - \text{Share}_{gas}) \quad (5)$$

Vale atentar que a equação estimada para os veículos flex registra uma elasticidade muito alta (-5,18) quando o preço relativo de etanol se aproxima a 70% (e menor nas extremidades), de modo que se utilizou uma forma funcional “log-log” para estimativa dessa equação. A melhor forma funcional (equação estimada no período 2006-2015) assumiu o valor mínimo de 0,56 e máximo de 0,72 para os níveis de corte da log-log.

É considerado que a frota de veículos a gasolina consome apenas gasolina C, e a frota álcool consome apenas etanol.

$$\text{Cons}_{gasolina} = \text{Fleet}_{gas} \times \text{Cons}_{veic} + \text{Fleet}_{flex} \times \text{Cons}_{vehic} \times \text{Share}_{gas} \quad (6)$$

e

$$\text{Cons}_{eth} = \text{Fleet}_{alco} \times \text{Cons}_{vehic} + \text{Frota}_{flex} \times \text{Cons}_{vehic} \times \text{Share}_{eth} \quad (7)$$

Os preços ao consumidor do etanol hidratado são projetados em função das variações do preço do etanol anidro<sup>10</sup> ao produtor  $P_{prod,eth}$  (variável endógena), acrescido de impostos ( $tax_{eth}$ ) e margens de comercialização ( $margin_{eth}$ ).

$$P_{cons,eth} = P_{prod,eth} + tax_{eth} + margin_{eth} \quad (8)$$

O preço da gasolina C ao consumidor ( $P_{cons,gas}$ ) é uma função do preço de realização da gasolina A, do percentual de mistura ( $mix$ ) e do preço do etanol anidro pago ao produtor, além dos tributos e margens de comercialização.

$$P_{cons,gas} = P_{prod,eth} * mix + P_{prod,gas} * (1 - mix) + tax + margin_g \quad (9)$$

Assume-se que o governo brasileiro reduz sua interferência preço de realização da gasolina A, de modo em que o preço da gasolina A é projetado em função do preço internacional

---

<sup>10</sup> Vale observar que os preços são diretamente correlacionados, de modo que a formação de preços pode ocorrer no mercado hidratado. Nessa seção o objetivo é apenas apresentar a mecânica do modelo.

da gasolina (que varia em função do preço do barril de petróleo) e câmbio nominal. Todos os preços são projetados em valores nominais e depois deflacionados para considerar as diferenças entre inflação interna e internacional.

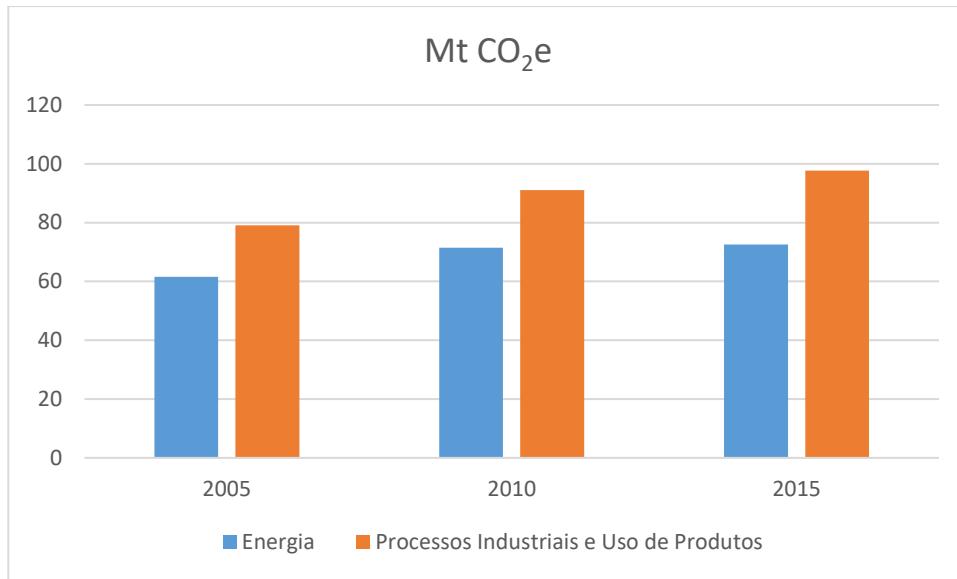
## II - Indústria

### 1. Introdução

As emissões do setor industrial compreendem aquelas provenientes da queima de combustíveis para fins energéticos, classificadas pelo IPCC como emissões de energia, e de transformações físicas e químicas que ocorrem nos processos de produção e uso de produtos, classificadas pelo IPCC como emissões de processos industriais e uso de produtos<sup>11</sup> (IPPU, sigla em inglês). No período 2005-2015, as emissões de energia responderam em média por 44% do total e as de IPPU por 56%. É importante notar, que alguns combustíveis são utilizados como agentes redutores na indústria metalúrgica ou como matéria prima industrial, sendo suas emissões classificadas como IPPU (MCTI, 2015a). Em 2005, as emissões industriais totalizaram aproximadamente 143 MtCO<sub>2</sub>e, subindo para 163 MtCO<sub>2</sub>e em 2010 e para 170 MtCO<sub>2</sub>e em 2015, um aumento de 19% quando comparado com o primeiro ano apresentado. A Figura 3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**apresenta emissões totais da indústria entre 2005 e 2015.

---

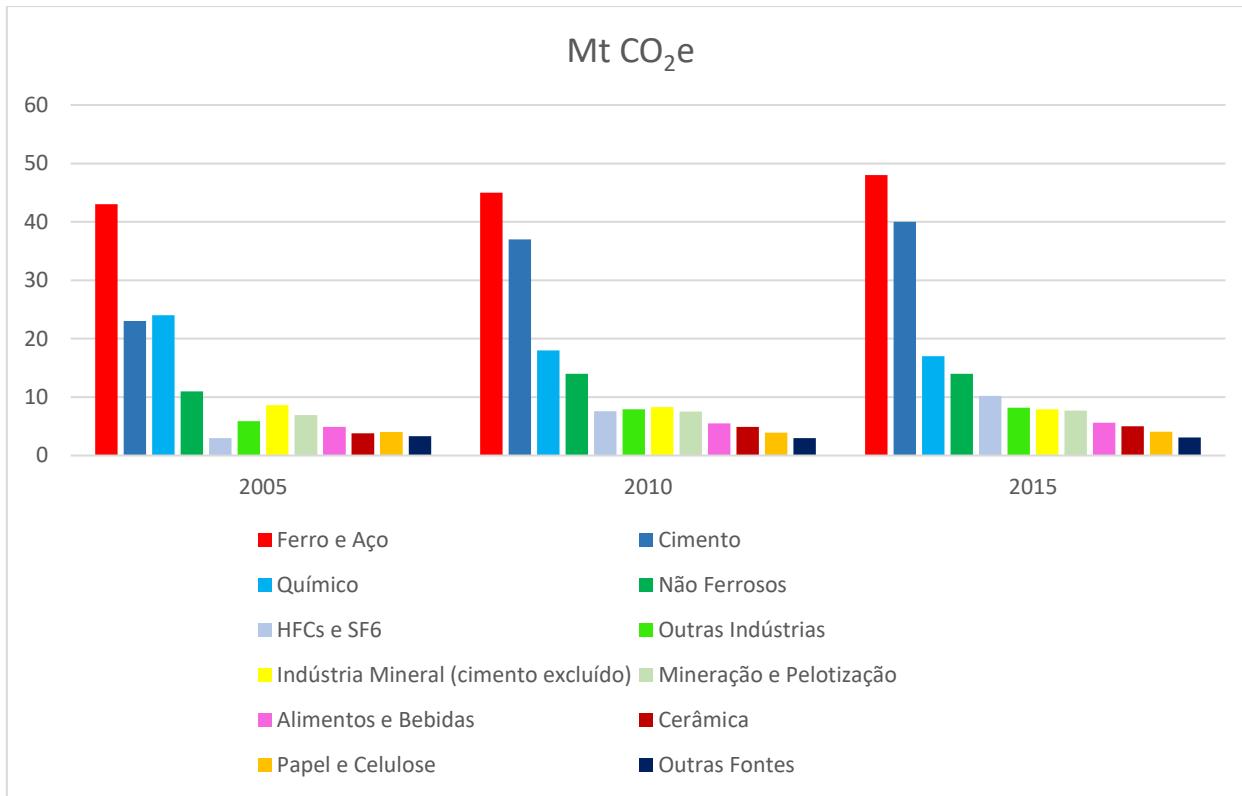
<sup>11</sup> Inclui emissões fugitivas de vazamentos de gases industriais



**Figura 3.** Emissões da indústria por fonte de emissão entre 2005 e 2015.

Fonte: elaboração própria com base em MCTIC 2017

Agregando-se todas as emissões e desconsiderando-se sua natureza, observa-se que o subsetor industrial mais emissor no período 2005-2015 é o de Ferro e Aço, seguido de Cimento. Juntos, esses subsetores emitiram 50% do total no período. A Figura 4 apresenta a evolução das emissões, por subsetor, no período. É importante ressaltar que a modelagem faz distinção entre emissões de energia e de IPPU como pode ser observado no item que descreve a metodologia utilizada.



**Figura 4.** Evolução das Emissões da Indústria por segmento

Fonte: A partir de MCTI (2017, 4ª edição)

Nota: valores ajustados para o GWP do AR5.

A tabela a seguir apresenta de forma resumida os segmentos industriais que compõe esta modelagem e a fonte de emissão de cada um deles, dividida entre energia, processos industriais e uso de produtos. No caso do setor de ferro gusa e aço, metais não-ferros e ferroligas as emissões de processo resultam da utilização de combustíveis redutores, como coque de carvão mineral, coque de petróleo, carvão e carvão vegetal (MCTI, 2015a).

**Tabela 13.** Segmentos industriais e suas fontes de emissão.

Segmento industrial	Emissões de energia	Emissões de processo	Uso de produtos
Ferro gusa e aço	x	x	
Cimento	x	x	
Alimentos e bebidas	x		
Metais não-ferrosos	x	x	
Cerâmica	x		
Produtos minerais (exceto cimento)	x	x	
HFCs e SF6			x
Papel e celulose	x		
Mineração e Pelotização	x		
Química	x	x	
Outras indústrias	x		

Fonte: elaboração própria

## 2. Metodologia

A modelagem do consumo energético e de emissões do setor industrial foi feita através de uma metodologia *bottom-up*. Esta metodologia é utilizada para descrever um determinado setor econômico através das tecnologias utilizadas.

O nível de detalhamento tecnológico, que visa estimar o consumo energético e emissões, foi adotado em função da homogeneidade de cada segmento industrial. Por exemplo, os setores de aço e cimento possuem poucas rotas de produção e um produto bem definido, desta maneira estes segmentos foram modelados de acordo com suas rotas e principais etapas de seus processos. Entretanto, setores como Alimentos e Bebidas possuem um grande espectro de produtos e processos, o que dificulta a modelagem desta indústria no mesmo nível que as anteriormente citadas. Sendo assim, os outros segmentos industriais foram modelados com um menor nível de detalhamento.

A primeira etapa da modelagem do setor industrial consistiu na desagregação do setor nos principais segmentos industriais: Metais não-ferrosos (inclui alumínio), Cimento, Ferro Gusa e Aço,

Papel e Celulose, Química, Alimentos e bebidas, Têxtil, Cerâmica, Ferroligas, Produtos Minerais (cal e vidro), Mineração e Pelotização, outras indústrias e HFCs e SF6.

Em seguida foi modelada a evolução do consumo energético de cada segmento. Em linhas gerais, pode-se reduzir a descrição do consumo energético em função do nível de atividade e da intensidade energética de cada processo produtivo, como mostra a Equação X.

$$D_{t,y} = IE_{t,y} \times NA_{t,y}$$

Sendo ‘ $D$ ’, a demanda de energia;  $IE$ , a intensidade energética (consumo de energia/unidade produzida);  $NA$ , o nível de atividade; ‘ $t$ ’, uma determinada tecnologia; ‘ $y$ ’ o ano. O crescimento do nível de atividade dos diversos segmentos industriais nos cenários estudados foi dado pela modelagem macroeconômica do modelo top-down IMACLIM-BR. A intensidade energética é uma variável que depende da sua série histórica e das tecnologias de mitigação adotadas para cada segmento industrial em cada cenário.

Os segmentos de Ferro-gusa e aço e Cimento foram modelados com um nível maior de detalhamento pelos motivos supracitados. Na indústria de ferro gusa e aço foi feita uma modelagem para cada uma das principais rotas de produção: rota integrada a carvão mineral, rota integrada a carvão vegetal e rota semi-integrada, além das principais etapas do processo, como coqueificação, sinterização, laminação, entre outras (MCTIC & ONU MEIO AMBIENTE, 2017b). Já para a indústria de cimento, a modelagem foi feita no nível das principais etapas do processo da fabricação de seu principal produto, o cimento Portland (MCTIC & ONU MEIO AMBIENTE, 2017a). Os outros segmentos industriais tiveram o seu consumo energético e emissões de GEE modelados de forma mais simplificada, levando em consideração o consumo energético, intensidade energética e a intensidade de emissões. Informações sobre como foram calculadas as quantidades de GEE emitido por cada segmento industrial serão apresentadas na seção a seguir.

## 2.1 Modelagem Setorial

As emissões industriais foram calculadas com base nas metodologias apresentadas nos relatórios de referência do Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCTI, 2015a).

## 2.1.1 Descrição do Modelo

### 2.1.1.1 Emissões de energia

O cálculo das emissões provenientes de consumo energético, apresentado pela Equação abaixo, consiste no produto entre o fator de emissão de GEE ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ) do combustível e o volume de combustível consumido.

$$EE_{Comb} = Comb \times FE_{Comb,GEE}$$

Onde  $EE_{comb}$  corresponde às emissões provenientes da queima de um determinado combustível ( $Comb$ ) e  $FE_{comb,GEE}$  é o fator de emissão de um determinado gás de efeito estufa ( $GEE$ ) para aquele combustível.

### 2.1.1.2 Emissões de processo e uso de produtos

Destaca-se que apenas alguns segmentos industriais emitem GEE em seus processos: os relacionados com a produção de metais, fabricação de cimento, cal, vidro e produtos da indústria química. O uso de produtos se refere aos gases fluorados utilizados principalmente em equipamentos de refrigeração e o hexafluoreto de enxofre usado em equipamentos de transmissão e distribuição de energia elétrica. Não foram estimadas as emissões  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{NF}_3$  em uso de produtos pois estes gases não aparecem no Terceiro Inventário.

#### 2.1.1.2.1 Emissões de processo da produção de metais

Durante a produção de metais, caso do setor de ferro gusa e aço, ferroligas e metais não-ferrosos, existe uma etapa onde ocorre a redução do minério, que tem como subproduto gases de efeito estufa. O cálculo das emissões de  $\text{CO}_2$  da principal fonte de emissões durante este processo de produção é dado pela equação a seguir. Esta equação representa as emissões que ocorrem devido à utilização de combustíveis redutores, como por exemplo o coque de carvão mineral, carvão vegetal etc.

$$E_{CO2e} = \sum_i \frac{\text{Combustível redutor}_i \times FE_i \times F_{ox} - C_{prod} \times \frac{44}{12}}{10^3}$$

Onde, “ $E_{CO2e}$ ” são as emissões de GEE em Gg de  $\text{CO}_2e$ ; “combustível redutor<sub>i</sub>” é o consumo de combustível redutor do tipo “i” informado pelo Balanço de Energia Útil para aquecimento

direto, em TJ; “FE é o fator de emissão<sup>12</sup>, em tCO<sub>2</sub>/TJ”; “F<sub>ox</sub>” corresponde ao fator de oxidação; “C<sub>prod</sub>” é a quantidade de carbono que fica contida no produto (t) ou percentual médio de carbono no aço/gusa<sup>13</sup> multiplicado pela produção em toneladas (MCTI, 2015a). Os fatores de emissão e a fração oxidada foram obtidos no relatório de referência sobre a produção de metais do terceiro inventário brasileiro (MCTI, 2015a).

A Equação a seguir foi utilizada para calcular as emissões de gases não-CO<sub>2</sub>, como o metano (CH<sub>4</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).

$$E_{N-CO_2e} = \sum_i \text{Combustível redutor}_i \times FE_i \times F_{ox}$$

Dentro do setor de ferro-gusa e aço há uma outra fonte de emissão, que não está relacionada com os combustíveis redutores. Calcário e dolomita são minerais utilizados nesta indústria como fundentes no alto-forno. Em MCTI (2015c) é apresentada uma metodologia para se estimar tais emissões, que consiste no produto do fator de emissão (0,440 tCO<sub>2</sub>/t calcário e 0,477 tCO<sub>2</sub>/t dolomita) pelo consumo destes dois minerais.

#### 2.1.1.2.2 Emissões de processo da produção de alumínio

Na produção de alumínio, além do CO<sub>2</sub>, outros dois gases são emitidos durante a redução de sua matéria prima mineral, o CF<sub>4</sub> (tetrafluormetano) e o C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> (hexafluoretano), também conhecidos como PFCs (perfluorcarbonos). A emissão destes gases foi calculada com base no fator de emissão implícito por tipo de tecnologia (Soderberg, Prebaked Anode), cujos valores foram retirados de MCTI (2015b) e apresentados na Tabela 14/Tabela 1.

**Tabela 14.** Tabela 1 Fatores de emissão implícitos de gases PFCs na produção de alumínio

Tecnologia	tCO <sub>2</sub> /t produto	t CF <sub>4</sub> /t produto	t C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> / t produto
<b>Prebaked Anode</b>	1,586	0,00019	0,00002
<b>Soderberg</b>	1,76	0,00176	0,0000063

Fonte: elaboração própria baseado em (MCTI, 2015a)

<sup>12</sup> Mais precisamente “conteúdo de carbono”.

<sup>13</sup> O percentual médio de carbono utilizado neste trabalho é de 1%

#### 2.1.1.2.3 Emissões de processo da produção de cimento

Na fabricação de cimento existe uma etapa chamada de calcinação, onde a matéria prima do cimento (calcário) é aquecida em fornos produzindo o clínquer, produto intermediário do cimento. Durante esta etapa ocorre a liberação de CO<sub>2</sub>. Para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> durante a produção de cimento foi utilizado um fator de emissão por tonelada de clínquer produzido, apresentado pela Equação a seguir. Este fator de emissão consiste na quantidade de CO<sub>2</sub> emitida por tonelada de clínquer utilizada. Os valores históricos desta razão são proveniente de MCTI (2015c) onde são reportadas as emissões de processo do setor de Cimento no Brasil até 2010. Já para os anos entre 2011 e 2020, anos em que não há medida de mitigação, nem valores anuais históricos, foi utilizado um valor constante de 0,54 tCO<sub>2</sub>/t cimento, calculado com base na média do período entre 2005 e 2010.

$$\text{Emissão da produção de clínquer} = \text{Produção de clínquer} \times \text{Fator de Emissão}_{\text{clínquer}}$$

#### 2.1.1.2.4 Emissões de processo de produtos minerais

Produtos minerais (cal e vidro) também apresentam emissões de gases de efeito estufa durante o processo de fabricação, mais especificadamente durante o processo de calcinação. O cálculo das emissões destes produtos é apresentado pela Equação a seguir. O fator de emissão, assim como para as emissões de processo na produção de cimento, consiste na quantidade de CO<sub>2</sub> emitida por unidade de produto. Em outras palavras foi estimado um fator de emissão implícito para os dois produtos com base nas emissões reportadas por MCTC (2015c) nos anos de 1990, 1995, 2000, 2005 e 2010. Para a cal, assumiu-se constante tanto a parcela de água contida quanto a proporção dos três tipos de cal (calcíta, magnesiana e dolomítica), resultando em um fator de emissão de 0,76 tCO<sub>2</sub>/t cal. Já para o setor de vidro, o fator de emissão implícito calculado para os anos apresentados em MCTC (2015c) resultam em 0,044 CO<sub>2</sub>e/t vidro.

$$\text{Emissão}_i = \text{Produção}_i \times \text{FE}_i$$

Onde  $\text{Emissão}_i$  corresponde às emissões do produto mineral,  $i$ ;  $\text{Produção}_i$  corresponde à produção do determinado produto  $i$ ; e  $\text{FE}_i$  é o fator de emissão deste produto.

### 2.1.1.2.5 Emissões de processo da indústria química

A indústria química fabrica diversos produtos que emitem gases de efeito estufa decorrentes de reações. Amônia, ácido nítrico, ácido adípico, caprolactama, carbuoreto de cálcio, petroquímicos, negro-de-fumo e ácido fosfórico são os produtos químicos que emitem gases de efeito estufa durante a produção. O cálculo de emissão destes compostos, Equação a seguir, é o produto entre a produção e a intensidade de emissão de GEE deste produto, apresentados em MCTI (2015c).

$$Emissão_i = Produção_i \times IE_i$$

Onde  $Emissão_i$  corresponde as emissões de um determinado produto da indústria química,  $i$ ;  $Produção_i$  corresponde a produção de um determinado produto  $i$ ; e  $IE_i$  é a intensidade de emissão deste produto  $i$ .

A tabela abaixo apresenta os fatores de emissão da indústria química com base nos produtos.

**Tabela 15.** produtos da indústria química e suas intensidades de emissão em tCO<sub>2</sub>e/t produto

Produto da indústria química	Intensidade (tCO <sub>2</sub> e/t produto)
Acrilonitrila	0.24
Amônia	1.45
Cloreto de Vinila	0.29
Coque de Petróleo Calcinado	0.01
Eteno	0.09
Metanol	0.33
Negro-de-fumo	1.61
Ácido Adípico	0.40
Ácido Nítrico	0.59
Óxido de Eteno	0.57
Ácido fosfórico	0.21

Fonte: elaboração própria com base em MCTIC (2015b)

Além disto, há emissões referentes ao consumo não energético de combustíveis na indústria química, que são utilizados como matéria prima. É o caso do Gás Natural Seco, Alcatrão e Nafta, cujas emissões são calculadas de acordo com a metodologia apresentada em MCTI (2015b).

A estimativa de GEE emitido por este consumo foi feito da mesma forma que emissões de processo da indústria química.

#### 2.1.1.2.6 Emissões de uso de produtos

Alguns equipamentos e produtos (*e.g.* aparelhos de refrigeração, aerossóis e espuma) contém gases de efeito estufa e quando utilizados, fabricados ou descartados geram emissões. Estes gases são os hidrofluorcarbonos (HFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>). Os HFCs são gases que são utilizados principalmente em aparelhos de ar-condicionado e refrigeração; e SF<sub>6</sub> é utilizado principalmente em equipamentos de transmissão e distribuição de energia elétrica (PLÖGER *et al.*, 2006).

#### 2.1.1.2.7 Resumo dos gases a serem inventariados por segmento industrial

A Tabela 16 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**apresenta por cada segmento, quais são suas fontes de emissão e quais gases são emitidos.

**Tabela 16.** Resumo das fontes de emissão e gases de efeito estufa emitidos em cada segmento industrial

Segmento	Fonte de emissão	Gases
Ferro gusa	Consumo energético, combustível redutor e produtos minerais	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Cimento	Consumo energético e emissão na produção de clínquer	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Química	Consumo energético, nos processos de fabricação de produtos químicos e uso não energético de combustíveis	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Alimentos e bebida	Consumo energético	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
papel e celulose	Consumo energético	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Metais não-ferrosos	Consumo energético e emissão de CO <sub>2</sub> e PFCs na produção de alumínio	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, PFCs
Ferroligas	Consumo energético e combustível redutor	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Mineração e Pelotização	Consumo energético	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Têxtil	Consumo energético	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Cerâmica	Consumo energético	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Produtos minerais	Calcinação na produção de cal e vidro	CO <sub>2</sub>
Outras indústrias	Consumo energético	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
HFCs	Utilização em equipamentos de refrigeração e ar-condicionado	HFCs
SF <sub>6</sub>	Utilização em equipamentos de transmissão e distribuição de energia elétrica	SF <sub>6</sub>

Fonte: elaboração própria

## 2.1.2 Tecnologias de mitigação consideradas

As tecnologias e medidas de mitigação que foram selecionadas para serem implementadas na modelagem foram retiradas da literatura, podendo-se destacar dois principais relatórios. O primeiro deles, Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chaves do Brasil, foi um estudo produzido pelo MCTIC e ONU Meio Ambiente que estimou os potenciais e os custos de abatimento de diversos setores, dentre eles a indústria (MCTIC & ONU MEIO AMBIENTE, 2017c). O segundo, intitulado Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selecionados, é uma série de relatórios publicados pela EPE entre 2017 e 2018 e contém medidas de eficiência energética, além de uma rica descrição sobre o consumo energético de vários segmentos industriais (EPE, 2017b).

A fim de evitar a narrativa extensa devido à descrição de cada uma das mais de 30 medidas utilizadas, elas estão apresentadas em quatro grupos: (i) Recuperação de calor, vapor ou gás, (ii) utilização de combustível renovável ou resíduo, (iii) melhorias no processo; (iv) utilização de gás de baixo GWP.

No primeiro grupo, (i) recuperação de calor, inclui medidas que aproveitam o calor residual dos diversos processos industriais reduzindo a demanda de energia externa. HENRIQUES *et al.* (2010) apresentam em sua modelagem de cenários de baixo carbono para a indústria brasileira, que cerca de 23% das emissões abatidas neste setor poderiam vir de recuperação de calor e vapor.

A (ii) utilização de resíduo ou combustível renovável consiste na diminuição ou substituição da participação de fontes fósseis por fontes renováveis, com o carvão vegetal. No caso da indústria siderúrgica, a utilização de carvão vegetal não substitui a produção já existente a coque de carvão mineral, apenas assume-se que as rotas de produção com o combustível renovável participarão mais do aumento da produção.

(iii) Melhorias no processo é um outro grupo de medidas que engloba melhorias no controle do processo, automação, equipamentos mais eficientes, entre outros. Estas melhorias podem tanto trazer uma redução do consumo energético, consequentemente das emissões de GEE, como também a redução de emissões fruto de reações químicas ou vazamentos de gases fluorados. Um exemplo disto ocorre na produção de alumínio, onde melhorias no controle de processo trazem uma redução nas emissões de gases fluorados (PFCs) (PUROHIT *et al.*, 2016).

A (iv) utilização de gás de baixo poder de aquecimento global (GWP, sigla em inglês) é referente aos gases fluorados utilizados principalmente nos aparelhos de refrigeração e ar-condicionado. Nesta medida, os atuais refrigerantes, cujo potencial de aquecimento global é de

milhares de vezes maior que o CO<sub>2</sub>, seriam substituídos por fluidos de GWP baixo, como por exemplo a utilização de CO<sub>2</sub> como gás refrigerante.

A Tabela 17 apresenta de forma resumida onde cada um desses grupos de medidas pode apresentar redução nas emissões.

**Tabela 17.** Tipos de medidas de mitigação por fontes de emissão

Tipo de medida	Aplicação da medida		
	Energia	Processo	Uso de produtos
Recuperação de calor	X		
Melhorias no processo	X	X	
Utilização de resíduos ou combustíveis renováveis	X	X	
Gás de menor GWP			X

Nota: esses tipos de medida são considerados em todos os seguimentos industriais sempre que aplicáveis

Fonte: elaboração própria

As medidas de mitigação utilizadas nos segmentos mais intensivos em energia e emissões são apresentadas na Tabela 18. No caso das demais indústrias, não foram inseridas medidas de mitigação específicas, apenas trabalhadas de forma geral e agregadas da forma como foi mencionado no início desta seção.

**Tabela 18.** Medidas de mitigação específicas de certas atividades industriais

Ferro gusa e aço	
Melhorias no processo	Coke Dry Quenching
	Inversores de frequência nos compressores de COG
	Injeção de carvão pulverizado
	injeção de gás natural
	Drivers de velocidade variável
	Controle de oxigênio do sistema de ventilação de ar de combustão com uso de VSD
	Queimadores Oxi-GN
	Pré aquecimento de sucata
	Sistemas de monitoramento automático e de metas em laminadores a frio
Recuperação de calor	Recuperação de calor na sinterização
	Recuperação de gás de alto-forno
	Recuperação do gás de aciaria e do calor sensível
	Recuperação do LDG
	Recuperação de calor da água
	Recuperação de calor dos fornos

	Redução das perdas de calor
	Recuperação de calor na pelotização
	Queimadores regenerativos
Utilização de resíduos ou combustíveis renováveis	Uso de resíduos de combustíveis
	Aumento da produção por carvão vegetal
Alimentos e bebidas	
Melhorias no processo	Otimização do retorno de condensado
	Manutenção periódica do purgador em caldeira
	Melhoria no isolamento de caldeira a gás
Recuperação de calor	Recuperação de calor a partir de gases de combustão em caldeiras
Cimento	
Melhorias no processo	Múltiplos estágios
	Controle e otimização da produção de clinquer
	Melhoria na combustão do forno
	Adição de aditivos na substituição de calcário
	Refratário no forno
Metais não-ferrosos	
Melhorias no processo	Otimização do fluxo de ar na combustão
	Controle de pressão e vazamento em fornos
	Uso de materiais isolantes em fornos
	Otimização de motores
Recuperação de calor	Recuperação de calor
Química	
Melhorias no processo	Adoção de queimadores low NOx em fornos
	Monitoramento e manutenção de caldeiras e motores
Recuperação de calor	Recuperação de calor
	Reciclo de condensado
	Integração de processos com análise pinch

Fonte: elaboração própria com base em (PREENCHER)

### 2.1.3 Apresentação e descrição das principais bases de dados utilizadas

Para desenvolver a modelagem do setor industrial foram utilizados os valores referentes aos consumos energéticos da série histórica. Estas informações foram extraídas do Balanço Energético Nacional, que é publicado anualmente pela EPE (EPE, 2017a). Nele é apresentada a quantidade de cada fonte de energia consumida por ano de diversos setores da economia, separando a indústria em 11 segmentos. Outro conjunto de informações importantes foi o nível de produção dos segmentos modelados.

Para o setor de Ferro-gusa e Aço, a produção anual de cada uma das rotas foi retirada do Estatísticas da Siderurgia, publicado pelo Instituto Aço Brasil (IABr) (2012- 2017). A quantidade fabricada de produtos minerais, como o cimento, e de mineração e pelotização foi retirada do Sumário Mineral Brasileiro, que é um documento elaborado pelo antigo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), atual Agência Nacional de Mineração (AMN), e nele constam informações sobre produção e desempenho de, aproximadamente, 50 produtos minerais (DNPM, 2016). Para o setor de metais não-ferrosos, a produção anual é proveniente do Mineral Data (CETEM & MCTIC, 2019) que é uma base de dados que reúne séries históricas dos principais minerais e produtos de primeira transformação mineral. O Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico publicado pelo Ministério de Minas e Energia fornece informações sobre a siderurgia brasileira, ferroligas e metais não-ferrosos (MME, 2017). O Sistema de Contas Nacionais publicado pelo IBGE fornece dados sobre o valor adicionado de todas as atividades econômicas, dentre eles Alimentos e Bebidas, Têxtil e o restante da indústria (IBGE, 2015). Outra base utilizada foi a Pesquisa Industrial Anual, também publicado pelo IBGE, que fornece informações sobre produtos e serviços da indústria nacional (IBGE, 2014)

Por fim, ressalta-se novamente que os relatórios setoriais do Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chaves do Brasil (MCTIC & ONU MEIO AMBIENTE, 2017d) junto com o relatório Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selecionados (EPE, 2018) forneceram as informações sobre as tecnologias de mitigação dos segmentos industriais, como seus potenciais, custos e penetrações.

A Tabela 19 resume as informações a respeito do PIB da indústria nos anos 2005 e 2015 bem como a produção dos diversos segmentos industriais que a compõe.

**Tabela 19.** PIB industrial e produção dos segmentos industriais em 2005 e 2015

Produção dos segmentos	2005	2015
PIB Industrial (Bilhões Reais)	1.358	1.584
Ferro-gusa e aço (Mt)	32	33
Cimento (Mt)	39	65
Química (Mt)	66	96
Ferroligas (Mt)	1	1
Alimentos e bebidas (Mreais)	75.838	119.229
Metais não-ferrosos (Mt)	2	1
Papel e celulose (Mt)	19	28
Mineração e pelotização (Mt)	257	494

Produção dos segmentos	2005	2015
Têxtil (Mreais)	12.844	13.375
Cerâmica (Mt)	76	103
Outras industrias (Mreais)	285.944	309.484

Fonte: elaboração própria com base em (DNPM, 2016, MME, 2017, IBGE, 2015, 2014, IBA, 2017, CETEM & MCTIC, 2019)

## 2.1.4 Referências bibliográficas

- CETEM, MCTIC, 2019. Disponível em: <[http://mineraldata.cetem.gov.br/mineraldata/app/\\*](http://mineraldata.cetem.gov.br/mineraldata/app/*)>. Acessado em: 31 Julho 2019.
- DNPM, 2016. *Sumário Mineral Brasileiro - 2015*. Brasília.
- EPE, 2017a. *Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2017*. Rio de Janeiro.
- EPE, 2017b. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/projeto-de-assistencia-tecnica-dos-setores-de-energia-e-mineral-projeto-meta>>. Acessado em: 31 Julho 2019.
- EPE, 2018. *Análise Da Eficiência Energética Em Segmentos Industriais Selecionados - Apresentação dos principais resultados do Projeto*. S.I. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/projeto-de-assistencia-tecnica-dos-setores-de-energia-e-mineral-projeto-meta>>.
- HENRIQUES, M.F., DANTAS, F., SCHAEFFER, R., 2010, "Potential for reduction of CO<sub>2</sub> emissions and a low-carbon scenario for the Brazilian industrial sector". In: . v. 38, pp. 1946–1961.
- IABR, 2012. *Estatísticas da siderurgia*. S.I.
- IBA, 2017. Disponível em: <<http://iba.org/pt/biblioteca-iba/historico-do-desempenho-do-setor>>. Acessado em: 7 Dezembro 2017.
- IBGE, 2014. Disponível em:  
[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa\\_resultados.php?id\\_pesquisa=32](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa_resultados.php?id_pesquisa=32).
- IBGE, 2015. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html?=&t=resultados>>. Acessado em: 7 Novembro 2018.
- MCTI, 2015a. *TERCEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA - RELATÓRIOS DE REFERÊNCIA: SETOR PROCESSOS INDUSTRIALIS, PRODUÇÃO DE METAIS*. S.I.
- MCTI, 2015b. *TERCEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA: RELATÓRIOS DE REFERÊNCIA - SETOR DE PROCESSOS INDUSTRIALIS - INDÚSTRIA QUÍMICA*. Brasília.
- MCTI, 2015c. *TERCEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA: RELATÓRIOS DE REFERÊNCIA - SETOR DE PROCESSOS INDUSTRIALIS - PRODUTOS MINERAIS*. Brasília.
- MCTIC, ONU MEIO AMBIENTE, 2017a, *MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR DE CIMENTO*. . S.I., s.n.
- MCTIC, ONU MEIO AMBIENTE, 2017b. *Modelagem Setorial De Opções De Baixo Carbono Para O Setor De Ferro-Gusa E Aço*. S.I. Disponível em: <[www.mcti.gov.br](http://www.mcti.gov.br)>.
- MCTIC, ONU MEIO AMBIENTE, 2017c, *Modelagem Setorial De Opções De Baixo Carbono Para O Setor De Ferroligas*. . S.I., s.n.
- MCTIC, ONU MEIO AMBIENTE, 2017d. *OPÇÕES DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SETORES-CHAVE DO BRASIL: SUMÁRIO EXECUTIVO*. Brasilia, DF.
- MME, 2017. *Anuário Estatístico Do Setor Metalúrgico: 2017*. Secretaria de Geologia Mineração e Transformação Mineral,Brasilia. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes>>.
- PLÖGER, F., SCHWARZ, W., THESEN, S., et al., 2006, "Chapter 8 Other product manufacture and use". In: *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventorie*. pp. 42.
- PUROHIT, P., HÖGLUND-ISAKSSON, L., BERTOK, I., et al., 2016, "Scenario Analysis for HFC Emissions in India : Mitigation potential and costs". In: .

### 3. Descrição da incorporação da proposta do componente 1

#### 3.1 Descrição da modelagem dos elementos propostos pelo Componente 1

A Tabela 20 apresenta os elementos do Componente 1, que dizem respeito ao escopo setorial, os gases de efeito estufa que deverão ser estimados, suas fontes entre outros. Também apresenta informações sobre como estes elementos propostos foram tratados pela modelagem e quais deverão ser modelados pelo Componente 2B.

**Tabela 20.** Descrição dos elementos propostos e como foram modelados

	Elemento proposto	Modelagem	Comentários
Escopo setorial	Alumínio, Cimento, Cal, Vidro, Ferro-Gusa e Aço, Papel e Celulose, Química, Bebidas e Alimentação, Têxtil, Cerâmica, Ferro-Ligas e Extração Mineral	Plenamente	-
Gases	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, PFCs, HFCs, SF <sub>6</sub> , NF <sub>3</sub>	Parcialmente	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O e PFCs foram estimados de acordo com os relatórios de referência do Terceiro Inventário. HFCs, e SF <sub>6</sub> foram estimados de forma simplificada devido à falta de informação sobre uso e descarte de equipamentos. NF <sub>3</sub> não foi estimado pois não aparece no inventário brasileiro.
Escopo das emissões	Emissões <b>(i) dos combustíveis; (ii) dos processos industriais; (iii) fugitivas;</b> (iv) da fermentação entérica da pecuária de corte	Plenamente	-
Período	Período inicial de cinco anos. Os seguintes serão ajustados de acordo com os períodos de compromisso da NDC	Parcialmente	O período inicial considerado foi de 5 anos (2021-2025). O segundo período foi de 2026-2030.
MRV (pomuc)	Reporte anual para todos os agentes regulados, com verificação de terceira parte, e <b>para os agentes econômicos da indústria com emissão anual acima de 15ktCO<sub>2</sub>e, sem necessidade de verificação.</b> As distribuidoras devem identificar vendas por uso final no pacote neutro.	Não atende	Modelagem por atividade industrial e não por agente econômico devido à ausência de informações e à diversidade dos setores industriais. Deverá ser modelado pelo componente 2B
Limiares de regulação	Indústria: estabelecimentos industriais com emissões anuais acima de 25ktCO <sub>2</sub> e; distribuidoras e importadoras de combustíveis: todas; Frigoríficos: apenas com inspeção federal.	Não atende	Modelagem por atividade industrial e não por estabelecimentos industriais devido à ausência de informações e diversidade dos setores industriais. Deverá ser modelado pelo componente 2B
Ponto de regulação	Indústria: estabelecimentos industriais	Não atende	Modelagem por atividade industrial e não por estabelecimentos industriais devido à ausência de informações e diversidade dos setores industriais.
Instrumento de precificação	INDEFINIDO NA MODELAGEM.  PARA A AIR: Mercado: devido à maior flexibilidade do mercado para a alocação de receitas, inclusive com múltiplas destinações e alterações ao longo do tempo, o CPI indicado para este pacote é o SCE. ps: esta opção de reciclagem de receitas poderia se dar com um tributo no caso da redefinição dos destinos da cide, embora dinamicamente mudanças futuras que venham a ser desejáveis sejam mais engessadas	Parcialmente	Será tratado pela modelagem do IMACLIM como tributação. Aspectos de mercado deverão ser analisados pelo componente 2B

	Elemento proposto nessa alternativa	Modelagem	Comentários
Critério de alocação das permissões/isenções sobre a base tributária	Mercado: Na primeira fase seria feita por grandfathering (50%) e leilões, por falta de informação necessária para o benchmarking e aprendizado. A partir da segunda fase, seria por benchmarking, complementado por leilões (aumentando proporção leilões), pelo fato de o método ser amplamente identificado como mais justo - o agente benchmark de cada setor receberia 50% das permissões gratuitamente, enquanto o de pior performance receberia 30%; emissores intermediários receberiam proporcionalmente; emissor único no setor receberia o benchmark; as emissões da produção exportada em um ano são contabilizadas como direitos gratuitos no seguinte	Parcialmente	Será tratado como isenções da base tributária na modelagem do IMACLIM. Aspectos de mercado deverão ser analisados pelo componente 2B
Isenções	Exportações; Nafta petroquímica, destinada à elaboração de petroquímicos; frigoríficos estaduais e municipais;	Plenamente	A modelagem de isenções será feita pelo IMACLIM
Proteção à competitividade	Na primeira fase: 10% de alocação adicional para setores em risco de competitividade (custo de controle > 10% do custo de produção ou intensidade de comércio > 10% ou combinação >15%); da segunda em diante 10% para setores em alto risco (custo de controle >15% ou intensidade comercial > 15% ou combinação >20%) e 5% para setores em médio risco (10% < c.c. ou i.c. < 15% ou 15% < combinação < 20%); além da proteção de exportações	Plenamente	A proteção à competitividade será simulada pelo IMACLIM
Base de cálculo	<u>Indústria</u> : Emissões estimadas diretamente de parâmetros de conteúdo de CO <sub>2</sub> equivalente, Tier 3, das emissões de processo e fugitivas por quantidade produzida;	Parcialmente	As emissões foram estimadas de acordo com a metodologia do Terceiro Inventário, com exceção a de alguns segmentos que, devido à falta de informações, foram estimados de forma simplificada através de fatores de emissão implícitos. Em linhas gerais, serão calculados em tier 2 ou tier 1.
Mecanismos de controle de preços	Fase inicial: preço teto de R\$ 30/tCO <sub>2</sub> e e preço piso de R\$ 20/tCO <sub>2</sub> e; Reserva de estabilidade com 10% das permissões a serem vendidas a R\$ 30 em caso de alcance do teto; reserva de novos entrantes com 5% das permissões	Não aplicável	Deverá ser analisado pelo componente 2B
Offsets	Somente offsets nacionais de Cotas de Reserva Ambiental (quando regulamentadas) e de projetos de MDS com MRV certificado, com uso restrito a 20% do montante total por	Plenamente	Será modelado no IMACLIM.

	Elemento proposto	Modelagem	Comentários
	agente regulado. Da segunda fase em diante, tal limite cairia para 10%.		
Penalização	Multa de R\$ 100 mil (ou 5% da média de faturamento da empresa regulada nos últimos 2 anos), ajustada pelo IPCA; além da obrigação de comprar permissões no montante de: (i) fase inicial - uma vez a quantidade não cumprida; (ii) fases seguintes: três vezes a quantidade não cumprida; Multa de R\$ 200 mil pela falsidade ou não observância das regras de relato, dobrando em caso de reincidência. Possibilidade de aplicação da lei de crime ambiental	Não atende	Todos os setores vão cumprir com as metas na modelagem do IMACLIM
Uso das receitas	(i) Compensações fiscais à União e os Estados pelo fim da CIDE Combustíveis; (ii) Compensações Distributivas via BF	Plenamente	Será modelado pelo IMACLIM
Ajustes nos instrumentos setoriais	Zerar CIDE combustíveis, Etiquetagem de energia e veicular para emissões de GEE, Remoção dos subsídios REPENEC e REPEX, Tarifas Binômias no mercado de energia elétrica (EE), Remoção dos subsídios ao carvão mineral, Abertura e adoção de Tarifas dinâmicas no mercado cativo de EE, adotar formato "feeback" no ROTA2030, Incluir critérios de elegibilidade por adoção de práticas de BC no crédito rural, Melhorar condições do seguro rural para práticas de BC, Alteração dos parâmetros no ITR. Além disso, deve representar o RenovaBio	Não atende	Deverá ser analisado pelo componente 2B

Fonte: elaboração própria

## 4. Descrição dos resultados a serem informados ao Componente 2B

### 4.1. Modelos setoriais

#### 4.1.1. Descrição das limitações de modelagem dos elementos propostos pelo Componente 1

A modelagem do setor industrial foi feita no nível de cada uma das atividades industriais selecionadas, e.g., subsetor de alimentos e bebidas, siderurgia, entre outros. Devido à ausência de informações que pudessem fragmentar estes segmentos industriais, a modelagem não pode ser feita no nível de cada unidade fabril. Desta maneira, o controle sobre unidades com emissão acima de 15ktCO<sub>2</sub> não pode ser analisado, bem como os limites de regulação e os pontos de regulação, que deverão ser analisados pelo componente 2B.

Instrumentos de precificação e o critério de alocação das permissões/isenções sobre a base tributária não puderam ser analisados pela modelagem industrial por serem aspectos de mercado e deverão ser analisados pelo componente 2B. Os mecanismos de controle de preços não foram aplicados na modelagem industrial e também deverá ser analisado pelo componente 2B.

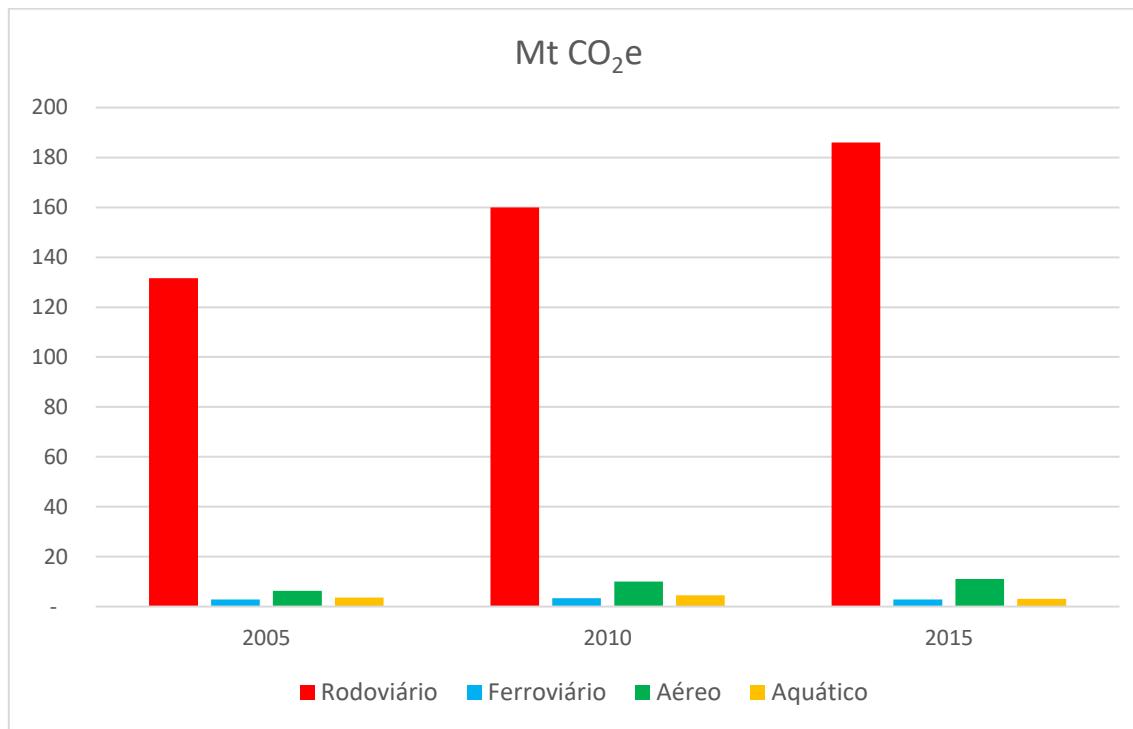
Em relação ao cálculo de emissão de GEE, estes foram feitos com base no Terceiro Inventário. Entretanto, alguns gases, como os fluorados, foram calculados de forma mais simplificada pois não há informações mais detalhadas sobre suas fontes, impossibilitando a adoção da metodologia do inventário citado.

Também merece destaque a remoção de subsídios à combustíveis. A matriz energética de cada indústria foi feita utilizando como base tendências na série histórica ou a substituição de combustíveis visando a redução de emissões. O preço dos combustíveis é uma variável exógena introduzida no perfil energético industrial. Sendo assim, a remoção de subsídios aos combustíveis não é considerada no modelo.

### III - Transportes

#### 1. Introdução

As emissões do setor de transportes cresceram 41% no período 2005-2015, passando de 144 para 203 MtCO<sub>2</sub>e. A participação do modo rodoviário fica em torno de 90%, tendo acompanhado o crescimento do total do setor em todo o período. O modo aéreo, apesar da menor participação nas emissões totais, teve um crescimento de 73% no período. Os valores estão apresentados na Figura 5.



**Figura 5.** Evolução das Emissões do Setor de Transportes

Fonte: A partir de MCTIC (2017, 4<sup>a</sup> edição)

Nota: valores ajustados para o GWP do AR5.

## 2. Metodologia

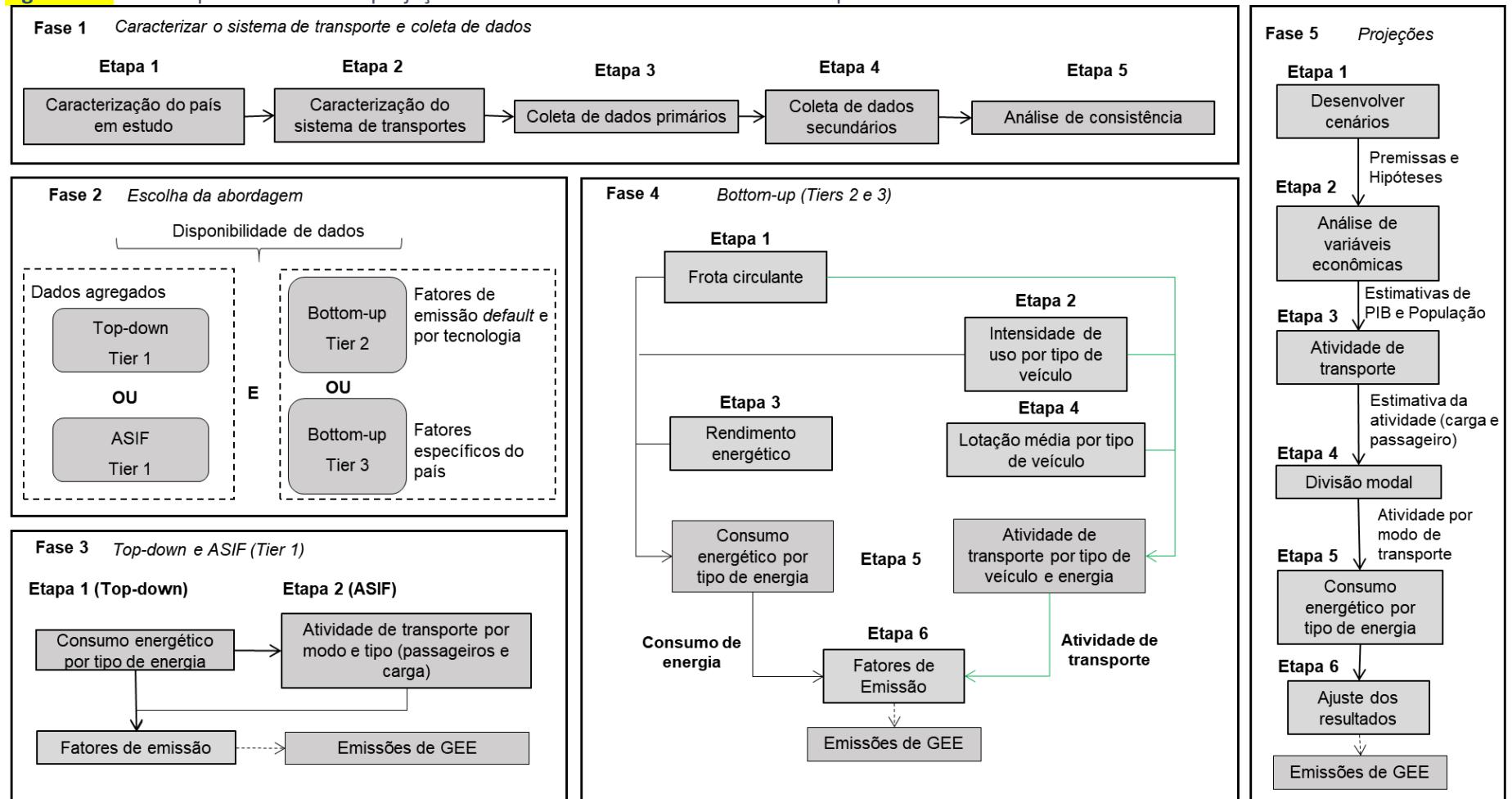
Fundamentalmente, o modelo para inventário de uso de energia e emissões de GEE considera as diretrizes apresentadas nos Guias para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC (IPCC, 2006), incorporando melhorias metodológicas desenvolvidas nos estudos de IBTS (2019) e Gonçalves & D'Agosto (2017). Portanto, são utilizadas, concomitantemente, três abordagens:

1. Abordagem *Top-Down*: as emissões de GEE são estimadas a partir da queima de energia (uso final) observada e da aplicação de fatores de emissão (FE) *default* ou locais (Tiers 1 ou 2);
2. Abordagem *Bottom-Up*: as emissões de GEE são estimadas a partir da contabilização do uso final de energia, desagregado por tecnologia, aplicando FE locais (Tier 3);
3. Abordagem *Activity–Structure–Intensity–Fuel* (ASIF): considera dados de atividade de transporte, intensidade energética e FE *default* para calcular emissões agregadas ou desagregadas de GEE.

Em síntese, adota-se uma abordagem *Bottom-Up* Tier 3 para o transporte rodoviário, ASIF Tier 1 para os transportes aquático, ferroviário e dutoviário, e ASIF Tier 2 para o transporte aéreo. Por fim, modela-se com base na abordagem de referência (*Top-Down*) todos os modos para calibrar os resultados das estimativas ASIF e *Bottom-Up*. A Figura 1 ilustra o modelo geral para estimativa e projeção das emissões de GEE que adota as três abordagens metodológicas a depender do nível de detalhamento dos dados locais. Conforme exposto no estudo IBTS (2019), o modelo abrange cinco atividades: (1) caracterizar o sistema de transporte e coleta de dados; (2) escolher a abordagem; (3) *Top-Down* e ASIF; (4) *Bottom-Up*; e (5) projeções.

As abordagens mais detalhadas (*Bottom-Up* e ASIF) permitem um tratamento de variáveis mais amplo, o que facilita a quantificação mais precisa do impacto das opções de mitigação adotadas, sobretudo das que dependem de variações tecnológicas. As principais saídas do modelo são: uso final da energia; emissões de GEE por tipo de veículo e modo de transporte (para diferentes fontes de energia); e atividade de transporte (passageiros e carga). Esses produtos são combinados com dados econômicos e demográficos para medir e relatar indicadores associados a opções de mitigação. A partir disso, os impactos das opções de mitigação são aferidos e precificados ao longo do horizonte temporal modelado (Grotterer *et al.*, 2018).

**Figura 6.** Método para estimativa e projeção das emissões de GEE do setor de transportes



Fonte: adaptado de IBTS (2019) e Gonçalves & D'Agosto (2017).

## 2.1 Modelagem setorial

Conforme exposto, os dados nacionais disponíveis para o transporte ferroviário, aquático, dutoviário e aéreo não são detalhados o suficiente para aplicar uma abordagem de *Bottom-Up* com baixa incerteza associada. Com isso, as emissões desses modos de transporte são estimadas por meio do uso agregado de energia por fonte de energia e fatores de emissão de GEE locais e *default*, empregando abordagens *Top-Down* e ASIF (Tiers 1 e 2). Por outro lado, as emissões do transporte rodoviário adotam as estimativas Tier 3 (para gases não-CO<sub>2</sub>) e Tier 2 (para o gás CO<sub>2</sub>).

### 2.1.2 Descrição do modelo

A atividade de transporte é calculada pelo produto entre o total de passageiros ou toneladas transportadas, o comprimento da rede e o percentual de quilometragem efetiva. Conforme mostrado nas equações 1 e 2, a aplicação de cada fórmula depende da abordagem escolhida.

$$AT_{m,a}^{top-down} = \sum_l p_l \cdot e_l \cdot km_l \quad (1)$$

$$AT_{m,a}^{bottom-up} = \sum_l F_v \cdot Uv_i \cdot Av_v \quad (2)$$

Em que,

*AT*: atividade de transporte por modo (*m*) e ano (*a*) (pass-km ou t-km);

*p<sub>l</sub>*: passageiro/carga anual transportada na linha (*l*);

*e<sub>l</sub>*: rede / linha (*l*) extensão (km);

*km<sub>l</sub>*: quilometragem efetiva da linha (*l*) (%);

*F<sub>v</sub>*: frota circulante para o veículo do tipo (*v*) (unidade/ano);

*Uv<sub>i</sub>*: intensidade de uso em km por ano (km/ano) para o veículo do tipo (*v*);

*Av*: Ocupação média do veículo para o tipo de veículo (*v*).

Na abordagem *Bottom-Up*, o consumo energético é estimado pelo cálculo ou coleta das variáveis: frota circulante; rendimento energético; e intensidade de uso por ano-modelo. A equação 3 representa o cálculo.

$$C_{i,v,a} = FC_{v,i,a} \cdot \frac{IU_{i,v,a}}{RE_{v,i,a}} \quad (3)$$

Em que,

$C_{i,v,a}$ : consumo anual do combustível tipo (i), veículo (v) e ano (a); ( $\text{m}^3/\text{ano}$ );

$FC_{v,i,a}$ : frota circulante do veículo (v), energia tipo (i), ano (a) (veículo/ano);

$IU_{i,v,a}$ : distância percorrida pelo veículo (v), combustível tipo (i) e ano (a) (km);

$RE_{v,i,a}$ : Rendimento energético do veículo (v), do combustível tipo (i), ano (a) (km/l).

A equação 4 mostra o cálculo da frota circulante.

$$FR_{iv,a} = \sum V_{i,v,a} (1 - S_{i,v,y,a}) \quad (4)$$

Em que,

$F_r$ : frota circulante do veículo (v), energia tipo (i) e ano (a) (veículo/ano);

$V_{i,v,a}$ : vendas anuais do tipo do veículo (v), energia tipo (i) e ano (a) (veículo);

$S_{i,v,y,a}$ : fração de veículos (v), energia tipo (i) e ano (y), sucateados no ano (a) (veículo).

Por conseguinte, a quantidade de veículos sucateados por tipo e energia é estimada pelas equações 5 e 6. A função *Gompertz* é usada para representar veículos equipados com motores do Ciclo Otto, enquanto a função Logística é adotada para representar veículos equipados com motores do Ciclo Diesel (Qian e Soopramanien, 2014).

$$S_{i,v,y,a}^{Gompertz} = \exp \{ - \exp [a + (b * t)] \} \quad (5)$$

$$S_{i,v,y,a}^{\text{Logística}} = \frac{1}{\{1+\exp[a(t-t_0)]\}} + \frac{1}{\{1+\exp[a(t+t_0)]\}} \quad (6)$$

Em que,

$S_{i,v,a,y}$  = fração de veículos (v), energia tipo (i) e ano (y), sucateados no ano (a) (veículo);

$t$  = idade do veículo;

$a$  = coeficiente de calibração;

$b$  = coeficiente de calibração.

Com isso, pode-se estimar as emissões de GEE utilizando FE *default* (em função da energia) ou locais (em função da energia e tecnologia). Salienta-se que as emissões dos GEE não- $\text{CO}_2$  são convertidas em unidades equivalentes de  $\text{CO}_2$  com base no índice GWP do *Fifth Assessment Report* (AR5) (PACHAURI et al., 2014).

As abordagens *Top-Down* e ASIF quantificam o consumo energético agregado de uma série de informações setoriais. Para efeito da energia, o seu valor é obtido em balanços energéticos nacionais.

Além disso, o método setorial ASIF considera a atividade de transporte, a intensidade de energia e os fatores de emissão em uma equação geral para calcular as emissões de GEE (Equação 7). Essa abordagem é adotada na presença de dados detalhados de atividade de transporte (por linhas ou operadoras), mas com o uso de fatores de emissão *default* (tC / TJ).

$$E_i = \sum_i A_i \cdot S_i \cdot I_i \cdot \sum_j F_{i,j} \quad (7)$$

Em que,

$E_i$ : emissões de GEE (Gg) do modo  $i$ ;

$A_i$ : atividade de transporte do modo  $i$  (pass-km ou t-km);

$S_i$ : divisão modal  $i$  (%);

$I_i$ : intensidade energética do modo  $i$  (kJ/t-km ou kJ/pass-km);

$F_{ij}$ : fator de emissão do combustível  $j$  para o modo  $i$  (tC/TJ).

Se a energia calculada pelas abordagens *Bottom-Up* e ASIF, para cada tipo de combustível, difere da estimada pela abordagem *Top-Down* (de referência), as diferenças podem ser resolvidas ao ajustar os valores de intensidade de uso e ocupação ou lotação do veículo.

Após estimativa das emissões de GEE e uso de energia para a linha de base, são identificadas ações de mitigação para o setor de transportes e o respectivo potencial de abatimento de carbono até o ano de 2030.

Após essa atividade, aplica-se a metodologia do estudo de Grotteria *et al.* (2018) para desenvolver curvas de custo marginal de abatimento (MACC) a partir da estimativa dos custos médios (*Capital Expenditure – CAPEX* e *Operational Expenditure – OPEX*) de cada tecnologia/ação de mitigação.

Curvas MACC determinam as opções de menor custo para atingir uma meta de mitigação de GEE desejada, tornando-se uma importante ferramenta de avaliação para os tomadores de decisão. Em síntese, além da produção de um possível cenário de mitigação de carbono, o método determina os custos médios de cada tecnologia de mitigação (Souza *et al.*, 2018).

### 2.1.3 Tecnologias/Medidas de mitigação consideradas

Este estudo considera ações de mitigação para o setor de transportes brasileiro discutidas em estudos como La Rovere *et al.* (2018; 2019) e IBTS (2019), além de eventos como o IV Workshop Cenários Prospectivos para Uso de Energia em Transportes” (IV WCPUET). A Tabela 21 sintetiza as ações consideradas.

**Tabela 21.** Emissões CO<sub>2</sub> por combustível

Ação de mitigação		Descrição
1	Mudanças nos padrões de transporte de carga e infraestrutura	Aumento da participação do transporte ferroviário e aquático na divisão modal.
2	Maior uso de biocombustíveis (Renovabio)	Aumento da mistura obrigatória de biodiesel BX; inserção da mistura obrigatória de bioquerosene; aumento da oferta de etanol; oferta de biometano.
3	Expansão da frota de veículos elétricos (veículos elétricos a bateria - BEV e híbridos)	Aumento da participação de veículos elétricos e híbridos na frota circulante.
4	Melhor logística de transporte de carga	Com base em programas de incentivo a boas práticas e etiquetagem no setor (p. ex. PLVB, Despoluir e CONPET).
5	Aumento da participação do transporte público por ônibus e do transporte ativo	Com base em programas de incentivo a uma melhoria da eficiência energética nas cidades (p. ex. EEMU), renovação e qualificação da frota de ônibus (Refrota e Finame), alterações nos processos de concessão, ampliação de faixas exclusivas (BRS), além do Incentivo ao transporte ativo.
6	Ganhos de eficiência energética na frota de veículos convencionais (Rota 2030)	Menor intensidade de carbono (tC/t-km ou p-km) e energética (TJ/t-km ou TJ/pass-km) na matriz de transporte nacional.
7	Maior uso de sistemas de transporte de massa	Incentivo ao transporte de alta capacidade (Metrô, trem urbano e veículo leve sobre trilhos) em centros urbanos.

Para o cenário de referência, a ação de mitigação 1, “Mudanças nos padrões de transporte de carga e infraestrutura”, considera a expansão das ferrovias e hidrovias consideradas no Plano Nacional de Logística (EPL, 2018), mediante a conclusão dos trabalhos em andamento do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) e do Programa de Parcerias de Investimentos. Especificamente, tem-se a ampliação e adaptação da rede ferroviária, aumentando a capacidade e reutilizando as linhas subutilizadas.

Na ação de mitigação 2, “Maior uso de biocombustíveis”, a mistura de biodiesel no óleo diesel mineral será de 20% (B20) até o final do período (2030) e a mistura de etanol anidro na gasolina C não será alterada (E27).

Com relação a oferta de etanol para o cenário de referência, a premissa considerada está alinhada com a oferta de etanol e as estimativas de mercado, obtidas junto à Associação Nacional das Distribuidoras de Combustíveis, Lubrificantes, Logística e Conveniência - Plural (aproximadamente 47 bilhões de litros). Neste caso, a quantidade de etanol se aproxima do volume exposto no cenário de alto crescimento do estudo " Cenários de Oferta de Etanol e Demanda do Ciclo Otto: 2018-2030" (EPE, 2018), que representa 50 bilhões de litros. Além disso, o consumo de biometano é considerado no transporte rodoviário (substituindo 10% da demanda

por gás natural veicular – GNV) e a mistura obrigatória de bioquerosene no querosene de aviação começara a partir de 2025 (B1), chegando a 5% em 2030).

A ação “Expansão da frota de veículos elétricos” considera a adoção gradual das tendências globais em direção à eletrificação. Os prognósticos apontam para o cenário de países em desenvolvimento (exceto China) da Agência Internacional de Energia (IEA, 2018), com incentivos para revenda e produção, exceto para baterias, de veículos leves e pesados (ônibus). Assim, considera-se que 9% da frota circulante de ônibus será composta híbridos e elétricos em 2030. Para outras categorias de veículos, espera-se que a eletrificação atinja 3,3% dos caminhões semileves, leves e médios e 5,2% dos automóveis e comerciais leves equipados com motores do Ciclo Otto.

Com base na ação de mitigação 4 “Melhor logística de transporte de carga”, há um melhoramento extra na eficiência energética de 4,5% para o transporte de carga, sobretudo entre os anos de 2025 e 2030. Isso é resultado da adoção de um conjunto de boas práticas por empresas associadas a programas sustentáveis com a adoção de padrões e certificações de sustentabilidade (p. ex. Programa Brasileiro de Logística Verde - PLVB).

Adicionalmente, a ação 5, “Aumento da participação do transporte público por ônibus e do transporte ativo”, leva em consideração a aplicação do caderno técnico “Eficiência Energética na Mobilidade Urbana - EEMU” para transporte de passageiros, sendo implementado pelos municípios brasileiros, além de programas como Pró-transporte/Refrota, que estimulam a participação de ônibus qualificados e elétricos. Isso é impulsionado pelo desenvolvimento de um programa nacional com condições diferenciadas (taxas, garantias, prazos etc.) para a renovação ou ampliação da frota de ônibus qualificados e elétricos. Alguns modelos de concessão são revistos para adequar requisitos específicos de operação desse tipo de tecnologias (vida útil, autonomia da bateria etc.), bem como a ampliação de corredores exclusivos de ônibus (*Bus Rapid Service - BRS*). Assim, há ampliação na demanda e ganhos em eficiência energética para o transporte coletivo (micro-ônibus e ônibus) e a captura a demanda do transporte privado de passageiros.

Nessa linha, a ação de mitigação “Maior uso de sistemas de transporte de massa” considera a ampliação da malha ferroviária para o transporte de passageiros. Há, portanto, demanda capturada do transporte privado para sistemas de VLT, metrô e trens urbanos até a conclusão de todos os trabalhos em andamento (PAC e Avançar).

A ação de mitigação “Ganhos de eficiência energética na frota de veículos convencionais” considera ganhos de eficiência energética em veículos convencionais (sobretudo os equipados

com motores do Ciclo Otto) até 2030, atendendo plenamente os objetivos do programa Rota 2030.

#### 2.1.4 Apresentação e descrição das principais bases de dados utilizadas

Os dados são obtidos de associações setoriais nacionais, ministérios e estudos de referência. No Brasil, não há registros de licenciamento de veículos nacionais estruturados o suficiente para fornecer informações sobre as contagens de veículos em circulação por ano-modelo. Além disso, não há dados oficiais sobre atividade de transporte por ano e modo de transporte. Portanto, para garantir a consistência da modelagem, calcula-se essas lacunas de forma desagregada, levando em consideração dados como licenciamento de veículos e atividade (p.ex. toneladas transportadas por ano e por categoria de veículo). A Tabela 22 resume os dados de entrada fundamentais para o modelo.

Na categoria de dados gerais, os dados de população e PIB são coletados a partir das estimativas populacionais anuais do IBGE e do Ministério da Economia. O consumo energético anual (linha de base) é obtido nas séries históricas do Balanço Energético Nacional (EPE, 2019). O percentual da mistura obrigatória de biocombustíveis nos combustíveis minerais (BX, EX) são obtidos nos estudos Brasil (2016) e IBTS (2019), enquanto a divisão modal é obtida no estudo Gonçalves e D'Agosto (2017).

Os FE *default* (tC/TJ) do setor de transportes são coletados no estudo IPCC (2016). Os FE locais para gases não-CO<sub>2</sub>, por tecnologia e fonte de energia, são obtidos com a CETESB, enquanto os FE de CO<sub>2</sub> por fonte de energia são referenciados do estudo Brasil (2014).

**Tabela 22.** Emissões CO<sub>2</sub> por combustível

Modo/ Descrição		Dados	Unidade	Fonte
Rodoviário	Dados macroeconômicos	População	Habitantes	IBGE
		Produto Interno bruto (PIB)	R\$	Ministério da Economia
	Demanda anual de energia	Por modo e atividade	tep; joule; kWh etc.	EPE (2019)
	Fatores de emissão	Por GEE	g/km; tC/TJ; kg/l	IPCC (2006); CETESB (2019); Brasil (2014)
	Combustíveis e biocombustíveis	Densidade	t/m <sup>3</sup>	ANP; EPE (2019)
		Composição	% mistura	Brasil (2016); IBTS; 2019)
		Poder calorífico	kcal/kg	ANP e EPE (2019)

Modo/ Descrição		Dados	Unidade	Fonte
	Divisão modal	Carga	% modo de transporte	Gonçalves & D'Agosto (2017)
		Passageiros		
	Dados setoriais	Atividade de transporte	t-km; p-km	Estimado com base em EPE (2012)
		Intensidade energética	kJ/t-km	Estimado e ajustado com valores de referência na literatura
		Frota por tipo de veículo; tecnologia e fonte de energia	Unidade	Estimado
		Licenciamento por ano-modelo	Unidade	Vaz et al (2015); NTU (2018); ABRACICLO (2019); ANFAVEA (2019); DENATRAN (2019)
		Rendimento energético por tipo de veículo; tecnologia e fonte de energia	l/km	CETESB (2019); IBTS (2019)
		Intensidade de uso	km/ano	Brasil (2014)
		Ocupação/lotação média	t/veículo; pass/veículo	ANTP; NTU
		Carga transportada	T; pass	ANTP; NTU; NTC & Logística;
		Quilometragem média por viagem	km/viagem	CETESB (2019); Brasil (2014)
		Coeficiente Global Warming Potential (GWP)	Unidade	Pachauri et al. (2014)
Aéreo	Dados setoriais	Atividade de transporte	t-km; pass-km	ANAC; EPE; McKinsey & Company
		Intensidade energética	kJ/t-km; kJ/pass-km	Estimado e ajustado com valores de referência na literatura
Aquático	Dados setoriais	Atividade de transporte	t-km	ANTAQ; EPE; GEIPOT
		Atividade de transporte	pass-km	ANTAQ; CCR Barcas; EPE; GEIPOT
		Intensidade energética	kJ/t-km; kJ/pass-km	Estimado e ajustado com valores de referência na literatura
Dutoviário	Dados setoriais	Atividade de transporte	t.km	EPL; GEIPOT e M. Transportes
		Intensidade energética	kJ/t-km	Estimado e ajustado com valores de referência na literatura
Ferroviário	Dados setoriais	Atividade de transporte	t-km	ANTT; EPE; GEIPOT
		Atividade de transporte	pass-km	CNT; EPE; GEIPOT; Metrô Rio e Supervia
		Intensidade energética	kJ/t-km; kJ/pass-km	Estimado e ajustado com valores de referência na literatura

Fonte: IBTS (2019).

Para o transporte rodoviário, a coleta de dados referente ao licenciamento de veículos leves e pesados para cálculo da frota circulante é realizada com base nos relatórios anuais da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2019). Especificamente no caso da categoria ônibus, utilizou-se as vendas estratificadas do estudo Associação Nacional

das Empresas de Transportes Urbanos (NTU,2018) para a desagregação dos licenciamentos, expostos no estudo da ANFAVEA (2019), em: urbanos, micro-ônibus e rodoviário. Para os licenciamentos de motocicletas, são considerados os anuários da Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares (ABRACICLO, 2019).

A quantidade de veículos leves adaptados para o uso de gás natural veicular (GNV) é estimada por meio de dados do DENATRAN (2019). Abate-se, portanto, essa estimativa dos veículos originalmente licenciados como *flexible-fuel*, gasolina ou etanol (dedicados), expostos no estudo ANFAVEA (2019). Por fim, a proporção veículos híbridos e elétricos na frota de leves é estimada a partir dos estudos IBTS (2019), DENATRAN (2019) e Vaz *et al.* (2015).

Ademais, o rendimento energético de veículos leves e pesados (exceto caminhões) é obtido no estudo da CETESB (2019). Para a categoria caminhões, considera-se o estudo IBTS (2019), que revisou os valores históricos de rendimento energético por categoria de caminhão, cujos valores são adotados também na Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC).

Os dados de viagens como intensidade de uso (km/ano) e distância média por viagem (km/viagem) são coletados nos estudos CETESB (2019) e Brasil (2014). Informações de ocupação/lotação média e carga/passageiros transportados, necessárias para estimar a atividade de transporte (pass-km e t-km), são coletadas nos anuários de instituições como Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP), NTUE Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística (NTC & Logística).

As informações necessárias para calcular a intensidade energética e a atividade de transporte (modos aéreo, ferroviário, aquático e dutoviário) são coletadas nos anuários das respectivas agências, confederações, associações e empresas setoriais, como Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Confederação Nacional do Transporte (CNT) e Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes (GEIPOT).

### 2.1.5 Referências bibliográficas

ABRACICLO - Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas Ciclomotores Motonetas Bicicletas e Similares (2019). Anuário da Indústria Brasileira de Duas Rodas 2019. Disponível em:<<http://www.abraciclo.com.br/downloads>>. Acesso em 01/05/2019.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (2019). Anuário da Indústria

Automobilística. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/anuarios.html>. Acesso em 01/05/2019.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Vendas de derivados de petróleo e etanol 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>>. Acesso em 01/03/2019.

ANTP - Associação Nacional de Transportes Públicos (2008). Sistema de Informações da Mobilidade Urbana: Relatório Geral 2007. São Paulo.

AMARAL, F. A., 2015, “Informações sobre taxa de vendas de veículos do tipo ônibus (híbrido e elétrico)”, Comunicação pessoal, diretor do Grupo Volvo Buses Latin America, Rio de Janeiro.

BRASIL, MCT - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do clima. MCTI, Brasília, DF, Brasil, v. 2, 2016.

BRASIL, MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 Ano base 2012 – Relatório Final, Brasília, 2014.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2017). Emissões veiculares no estado de São Paulo - 2016. Disponível em:< <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12034.103>>. Acesso em 01/05/2019.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2019). Emissões veiculares no estado de São Paulo - 2019. Disponível em:< <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>>. Acesso em 01/05/2019.

DENATRAN (2019). Frota de Veículos. Disponível em: <https://www.denatran.gov.br/estatistica/237-frota-veiculos>. Acesso em: 01/05/2019.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Estudo Associado ao Plano Decenal de Energia – PDE 2021. Consolidação de Bases de Dados do Setor de Transporte: 1970-2010. Nota técnica SDB-Abst 1/12012, Ministério de Minas e Energia, Brasil, 2012.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional - 2019. Ano Base 2018, Ministério de Minas e Energia, DF, Brasil, 2019.

EPL – Empresa de Planejamento e Logística S. A. Plano Nacional de Logística PNL – 2025, Relatório Executivo. Brasília – DF, 2018.

GONÇALVES, D. N. S.; D'AGOSTO, M. de A. Future prospective scenarios for the use of energy in transportation in Brazil and GHG emissions, Business as Usual (BAU) scenario – 2050, Final Report. 1<sup>a</sup> ed, Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável (IBTS), Rio de Janeiro, 2017.

GROTTERA, C. (2018). Custos Setoriais de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil para um Cenário Global de 1,5º em 2050, in Rovere, E. L.L.; Wills, W.; Dubeux, C. B. S; Pereira Jr, A. O.; D'Agosto, M. A; Walter, M. K. C; Grotterá, C.; Castro, G.; Schmitz, D.; Hebeda, O.; Loureiro, S. M.; Oberling, D; Gesteira, C.; Goes, G.V.; Zicarelli, I.F.; e Oliveira, T.J.P (2018). Implicações Econômicas e

Sociais dos Cenários de Mitigação de GEE no Brasil até 2050: Projeto IES-Brasil, Cenário1.5 ° C.

COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

IBTS – Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável. Transportes no Brasil – Panorama e Cenários

Prospectivos para atendimento da Contribuição Nacionalmente Determinada, 2019.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies.

LA ROVERE, E. L.L.; WILLS, W.; DUBEUX, C. B. S; PEREIRA JR, A. O.; D'AGOSTO, M. A; WALTER, M. K. C; Grottera, C.; Castro, G.; Gonçalves, D. N. S.; Hebeda, O.; Loureiro, S. M.; Oberling, D; Gesteira, C.; Goes, G.V.; Zicarelli, I.F.; E Oliveira, T.J.P (2018). Implicações Econômicas e Sociais dos Cenários de Mitigação de GEE no Brasil até 2050: Projeto IES-Brasil, Cenário1.5 ° C. COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

NTU - Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos. Anuário 2018 – 2017. Disponível em:

<<https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub636687203994198126.pdf>>. Acesso em 01/05/2019.

PACHAURI, R. K., ALLEN, M. R., BARROS, V. R., BROOME, J., CRAMER, W., CHRIST, R., ... & DUBASH, N. K. (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 151.

SOUZA, J. F. T., de Oliveira, B. P., Ferrer, J. T. V., & Pacca, S. A. (2018). Industrial low carbon futures: a regional marginal abatement cost curve for São Paulo, Brazil. Journal of Cleaner Production, 200, 680-686.

VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. C. (2015) Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento. Automotivo. BNDES Setorial, v.41, p.295-344.

### 3. Descrição da incorporação da proposta do Componente 1

Para efeito da aplicação do método no setor de transportes, o ponto de regulação “combustíveis para fins não industriais” impacta no preço dos combustíveis, efetivamente sobre a escolha de abastecimento entre Gasolina C e Etanol hidratado de veículos do tipo *flexible-fuel* (que representam aproximadamente 55% da frota circulante do transporte rodoviário). Esse cálculo é conduzido mediante a atividade iterativa de identificação da demanda por energia no modelo de transportes, verificação da capacidade de atendimento da demanda e informação do novo *market share* no modelo *Brazilian Land Use Model* (BLUM) e, por fim, calibração do *market share* estimado para cada ano no modelo de transportes.

Além disso, em caso de aumento da Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico (Cide-combustíveis) sobre o diesel mineral, tem-se efeito nos custos operacionais do transporte de carga e passageiros e, consequentemente, na atividade de transporte e nas vendas futuras de caminhões e ônibus do Ciclo Diesel.

Insere-se nesse ponto de regulação, elementos como: distribuidoras e importadoras de diesel, gasolina, óleo combustível, querosene de aviação e gás natural. Adota-se um modelo feebate no Rota 2030 onde fabricantes de veículos leves que superarem a meta mínima de aumento de eficiência energética ganham desconto extra de 1 ou 2 pontos porcentuais (pp) na alíquota no IPI a partir de 2023

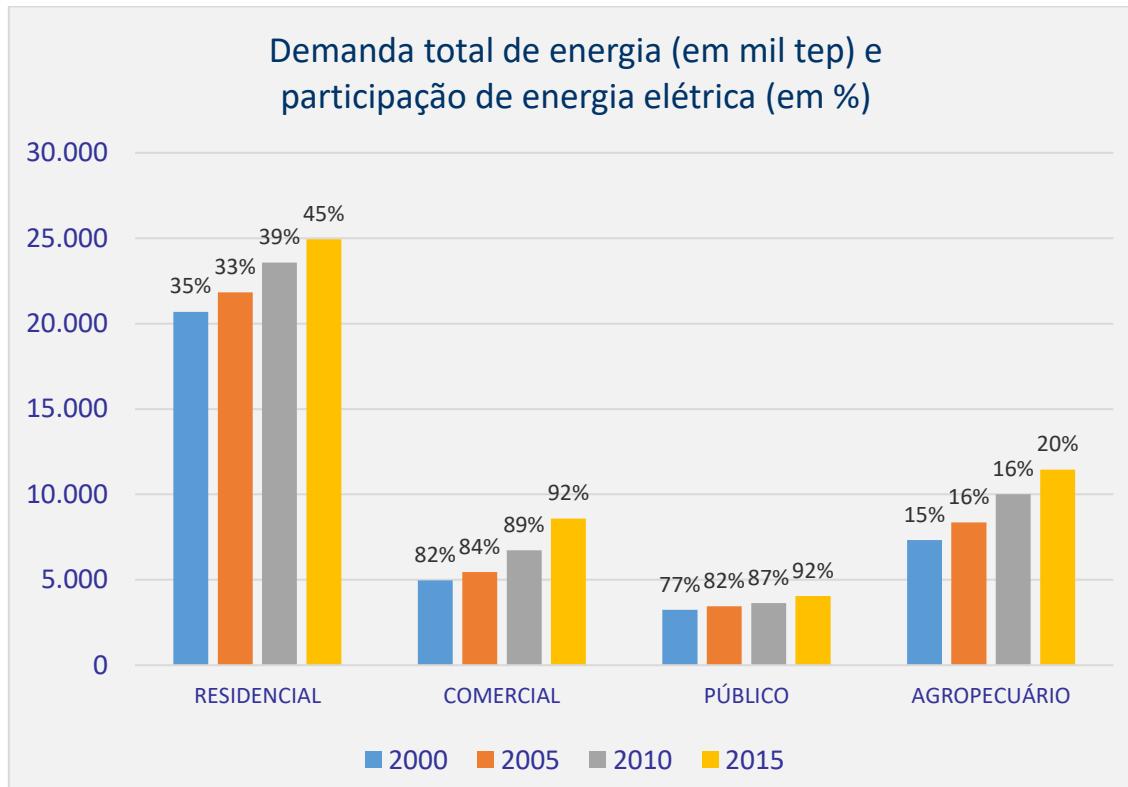
#### 4. Descrição dos resultados a serem informados ao Componente 2B

As compensações fiscais à União e os Estados pelo fim da CIDE Combustíveis são indiferentes para o modelo de transportes.

## IV – Demanda de Energia em Outros Setores (Residencial, Comercial, Público e Agropecuária)

### 1. Introdução

Como reflexo do crescimento da população e do PIB, o consumo anual de energia dos setores residencial, comercial, público e agropecuária (segundo a classificação do Balanço Energético Nacional) têm crescido ao longo deste século, como ilustrado pela Figura 7:



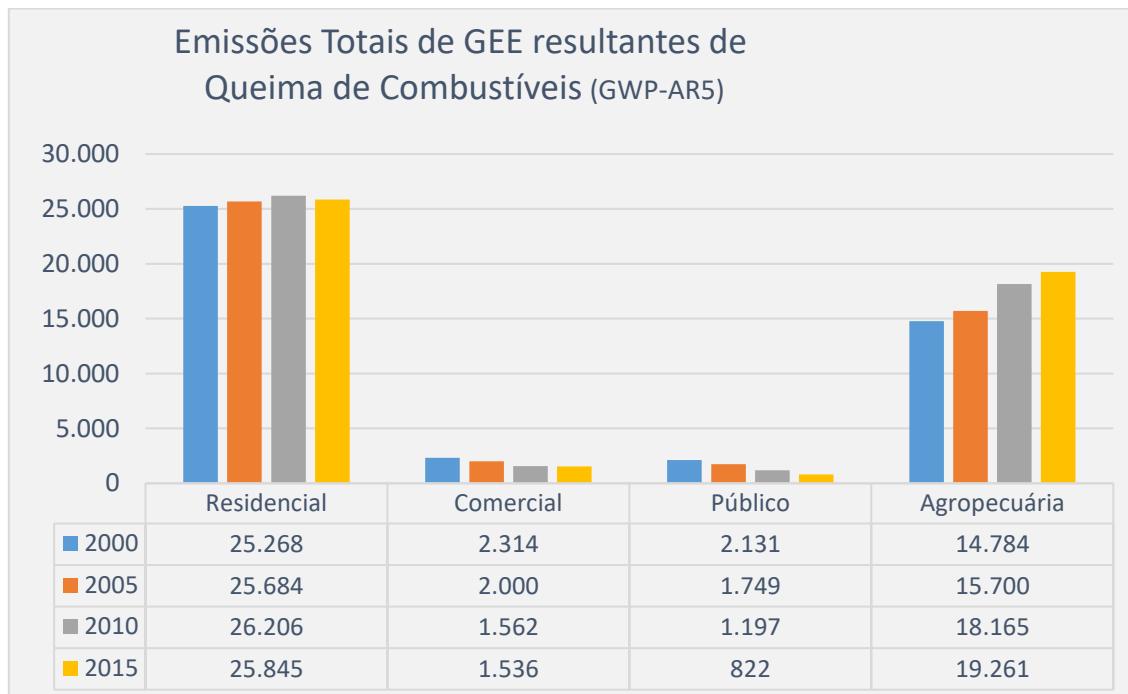
**Figura 7.** Evolução da demanda de energia e da participação da energia elétrica no total dos setores residencial, comercial, público e agropecuário (mil tep e %)  
 Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BEN/EPE

A figura também ilustra a participação crescente do uso da eletricidade em substituição às outras fontes de energia, sendo que nos setores comercial e público ela predomina fortemente sobre o conjunto de todas as demais fontes. Estas últimas, em ordem decrescente de importância, são o GLP, gás natural, lenha e carvão vegetal. De fato, nesses dois setores, caiu para menos da metade a proporção desses combustíveis na energia total consumida, chegando a eletricidade a abranger 92% do consumo setorial de energia, em 2015.

No setor residencial, há ainda um uso muito intenso de lenha e GLP, somando essas duas fontes cerca da metade do consumo de energia em 2015. Já no setor agropecuário, o diesel é que responde por metade do consumo, ficando a lenha com cerca de um quarto.

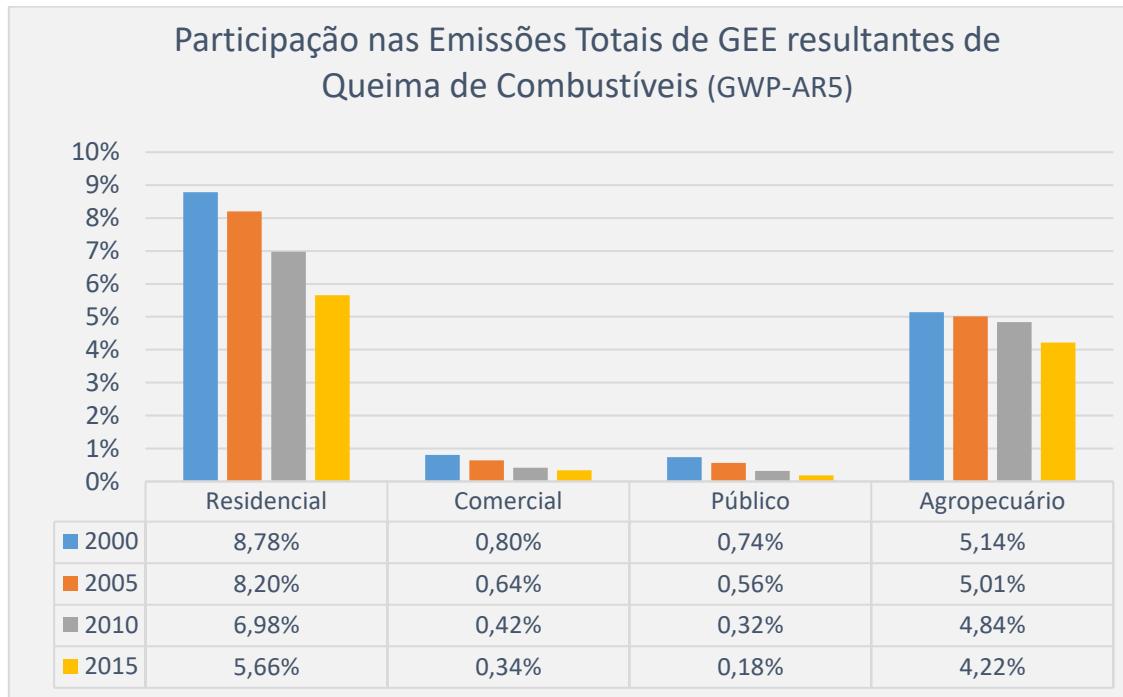
A adoção mais intensa da eletricidade no setores comercial e público resultou na queda das emissões de GEE desses setores desde 2005, como ilustrado na figura 4.2 abaixo. Ou seja, esses setores diminuíram as emissões em termos absolutos, mesmo aumentando o consumo de energia. Emissões por conta da geração termoelétrica se deslocaram desses setores de consumo final para o de produção de eletricidade.

Nos setores residencial e agropecuário as emissões continuaram a subir, com exceção da pequena queda em 2010-2015 no setor residencial, como mostra a Figura 8:



**Figura 8.** Emissões totais dos setores residencial, comercial, público e agropecuário (MtCO<sub>2</sub>e)  
 Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BEN/EPE e IPCC/AR5

De qualquer modo, a maior adoção de energia elétrica teve como consequência uma queda, ao longo de todo o século XXI, na participação relativa das emissões desses quatro setores no total das emissões provenientes da queima de combustíveis, o que é ilustrado pela Figura 9 a seguir:



**Figura 9.** Participação dos setores residencial, comercial, público e agropecuário na emissões totais do País resultantes da queima de combustíveis (%)  
 Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BEN/EPE e IPCC/AR5

Verifica-se, portanto, que o peso desses setores nas emissões de energia totais do País é relativamente pequeno. Em 2015, totalizam apenas cerca de 10% das emissões, enquanto representavam mais de 15% em 2000 e perto de 20% em 1990. Em particular, os setores comercial e público somam perto de 0,5% em 2015 das emissões totais de energia, com tendência à queda. Assim, o comportamento futuro das emissões de tais setores será correlacionado com o PIB sem considerar qualquer mudança tecnológica ou de hábitos.

Assim, nos limitaremos a modelar, de forma simplificada, as emissões resultantes da queima de combustível nos setores residencial e agropecuário. Como não são contabilizadas emissões fugitivas nesses setores, as emissões da queima de combustíveis correspondem ao total das emissões provenientes do uso setorial de energia. Convém assinalar que o setores residencial,

comercial e público, tratados algumas vezes internacionalmente como “setor de edificações” (*buildings*), tem no Brasil um papel bem menor nas emissões de GEE do que o verificado na maioria dos países desenvolvidos, cujo clima exige grande dispêndio de energia para o aquecimento de água e de ambientes, o que é desnecessário na maior parte do território brasileiro.

## 2. Metodologia

### 2.1. Modelagem setorial

#### 2.1.1. Descrição do modelo

Como não estão previstas medidas de mitigação, a modelagem das emissões de energia dos setores residencial e agropecuário se limitam a estender no futuro as tendências observadas nas últimas décadas, em todos os cenários. Em termos de demanda total de energia, o setor residencial deveria seguir algum indicador que reflita a demanda de energia residencial, tais como os rendimentos domiciliares totais dos habitantes do país, a evolução da população, ou a renda per capita. Já a agropecuária deveria seguir a taxa de crescimento do PIB setorial. Para testar preliminarmente a aderência a essas hipóteses foi verificada a variação total ocorrida no período 2000-2015, em termos da demanda total de energia de cada um desses setores e de alguns dos principais indicadores macroeconômicos. A Tabela 23 abaixo ilustra as tendências gerais ao longo do período. Para a renda per capita, utilizou-se o período 2000-2014, devido à maior disponibilidade de dados.

**Tabela 23.** Comparações de taxas de crescimento 2000-2014 e 2000-2015

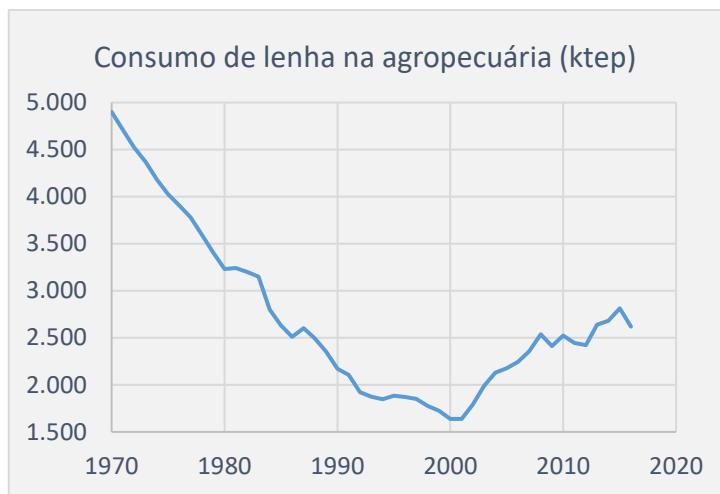
	2000	2014	2015	Var 2014/2000	Var 2015/2000
<b>Energia do setor Residencial</b>					
Energia Total (ktep)	20.688	24.808	24.941	19,9%	20,6%
Eletroicidade (ktep)	7.188	11.373	11.278	58,2%	56,9%
GLP+Gas Nat. (ktep)	6.425	6.845	6.853	6,5%	6,7%
Lenha+Carv. Veg. (ktep)	6.979	6.587	6.807	-5,6%	-2,5%
Renda domiciliar per capita, preços 2014 (R\$)	675	1.152		70,7%	
População (milhares)	173.448	201.718		16,3%	
Renda domiciliar total (milhões de R\$)	117.063	232.426		98,5%	
<b>Energia da Agropecuária</b>					
Energia Total (ktep)	7.322	11.173	11.451	52,6%	56,4%
Diesel+O. Combustível (ktep)	4.558	6.185	6.311	35,7%	38,4%
Eletroicidade (ktep)	1.105	2.285	2.303	106,8%	108,4%
Lenha (ktep)	1.638	2.682	2.814	63,7%	71,8%
PIB Agropecuária (milhões de R\$ de 2010)	107.338	182.386	188.430	69,9%	75,5%

Comentários gerais sobre a tabela:

1. O crescimento do consumo total de energia nos setores residencial e agropecuário, nos períodos descritos, estão quase sempre abaixo dos indicadores macroeconômicos correspondentes, implicando um uso menos intensivo de energia nos dois casos, devido a mudança de hábitos ou evolução tecnológica.
2. A variação do consumo das diferentes fontes de energia durante o período é bastante diferenciada de uma fonte para outra, indicando que os comportamentos de cada tipo de fonte têm de ser analisados e projetados em separado.
3. O consumo de energia elétrica cresce bem mais do que os outros tipos de energia.

### 2.1.1.1 Agropecuária

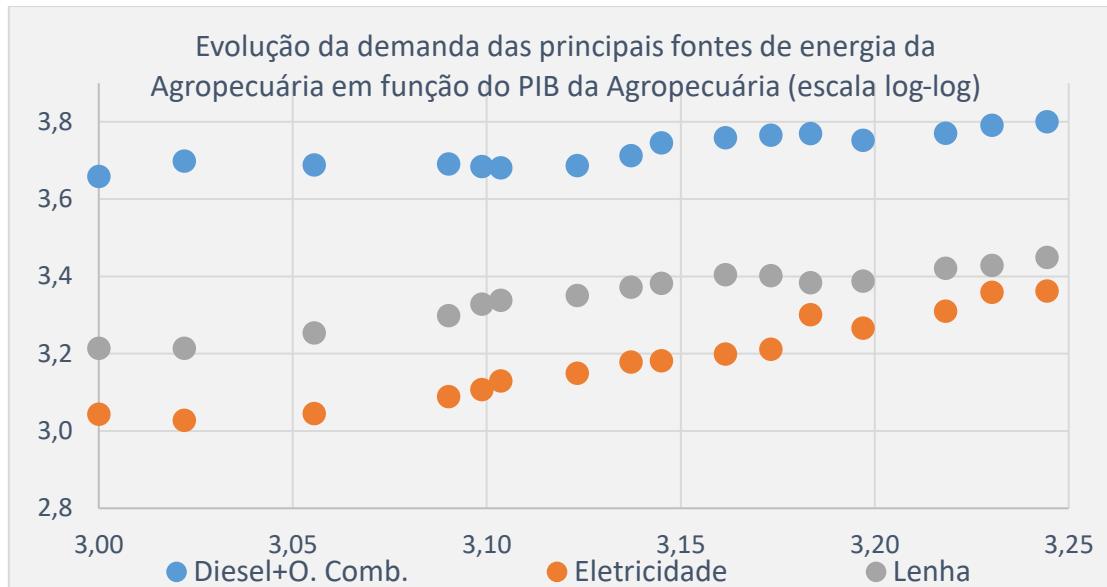
O PIB da agropecuária cresceu 75,5% de 2000 a 2015, e o consumo de lenha foi o único que teve variação da mesma ordem de grandeza, indicando uma elasticidade perto de um. É interessante observar que ocorreu uma forte reversão de tendência no consumo de lenha na agropecuária durante a virada do século, como ilustrado pela Figura 10 ao lado. A queda firme e consistente verificada nas últimas décadas do século XX foi substituída por um forte crescimento a partir de 2001. Dentre as possíveis explicações está o maior uso de lenha proveniente de florestas plantadas.



**Figura 10.** Evolução do consumo de lenha na agropecuária (ktep)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BEN/EPE

Por outro lado, a demanda por eletricidade mais do que dobrou no período, enquanto o consumo de óleo diesel cresceu bem menos do que o PIB setorial, indicando maior eficiência devido a economias de escala ou outros fatores. É possível estimar o comportamento futuro das demandas por essas fontes de energia através do cálculo das suas elasticidades em relação ao PIB setorial. A Figura 11 abaixo, em escala log-log, mostra que as três principais fontes de energia têm tendências bem definidas, permitindo o cálculo dessas elasticidades e as projeções.



**Figura 11.** Demanda de energia na Agropecuária em relação ao PIB setorial

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BEN/EPE e do IBGE

A figura acima indica que as emissões associadas ao óleo diesel respondem fracamente ao aumento do PIB setorial; o contrário acontece com a eletricidade, com curva mais inclinada; enquanto a lenha tem um comportamento intermediário. O cálculo das elasticidades correspondentes permitirá projetar o crescimento da demanda por essas fontes de energia, assim como as emissões de GEE correspondentes, em função da taxa de crescimento do PIB da agropecuária.

Observe-se que, como as emissões da eletricidade vinda da rede não é computada setorialmente e a lenha não tem suas emissões de CO<sub>2</sub> contabilizadas, segundo a metodologia do IPCC, resta somente o óleo diesel como emissor significativo de GEE, no âmbito da energia consumida na agropecuária. Como sua elasticidade em relação ao PIB setorial deve ser baixa, é de se esperar que a energia consumida na agropecuária venha a contribuir menos para o aumento as emissões de GEE, mesmo que o crescimento relativo do setor seja maior do que o restante da economia do país.

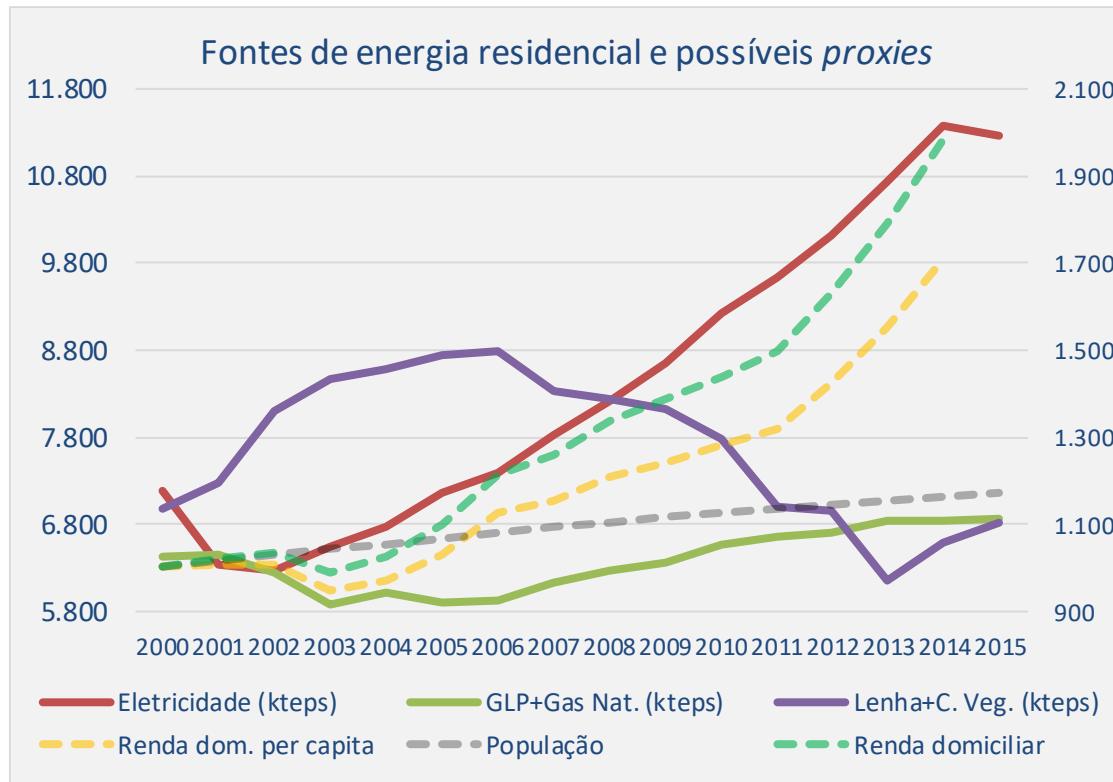
#### 2.1.1.2. Setor Residencial

A modelagem da energia consumida no setor residencial é feita em países desenvolvidos em função dos dados históricos e projeções quanto à área construída para uso habitacional. Isso se deve à disponibilidade de dados detalhados e a correlação entre o consumo de energia por equipamentos de aquecimento de ambientes e as áreas abrangidas por esses equipamentos. Por

sua vez, a modelagem da expansão da área habitacional depende de fatores como graus de urbanização, tamanho médio de famílias, crescimento populacional endógeno, imigração, infraestrutura de transportes e mobilidade urbana, etc. No caso brasileiro, devido à menor disponibilidade de dados e a ausência de correlação clara entre a área do imóvel e seu consumo de energia, pressupõe-se que o consumo de energia residencial dependa do crescimento populacional e da renda da população, além do preço das diversas fontes de energia, embora esta tenha uma demanda relativamente inelástica.

A tabela 4.1 acima mostra que o consumo de energia residencial tem crescido bem menos do que o que seria de se esperar, dados os indicadores macroeconômicos. O aumento no período 2000-2014, da ordem de 20%, está pouco acima do crescimento populacional no período (16,3%). Isso deixa pouca margem para que a forte elevação da renda per capita, mais de 70% em termos reais no período, se refletisse em aumento de demanda. A explicação para esse crescimento moderado pode estar na evolução tecnológica, com a introdução de lâmpadas fluorescentes compactas e LEDs, a substituição de TV com tubos de raios catódicos por painéis de LCDs e LEDs e outras mudanças.

De qualquer modo, a projeção de demanda futura de energia residencial depende da identificação de variáveis que possam servir como *proxies* para a demanda residencial. A Figura 12 abaixo mostra que as três principais fontes de energia residencial têm tido comportamentos bem diferenciados ao longo deste século, o que sugere a utilização de *proxies* diferentes.



**Figura 12.** Demanda das principais fontes de energia residencial e possíveis *proxies* (base 2000)  
 Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BEN/EPE e IBGE

A eletricidade mostra um crescimento contínuo e consistente, exceto nos anos inicial e final da série, e poderia ser estimada através do crescimento populacional, que também teve um comportamento homogêneo ao longo do período, restando calcular a elasticidade. Já a lenha mais carvão vegetal (este em menor quantidade) cresce até 2006 e cai a partir de então, retomando o crescimento nos dois últimos anos da série. Nenhum dos *proxies* considerados tem curva semelhante. Finalmente, o GLP + Gás Natural (este último com peso bem menor) teve queda com oscilações até 2006 e cresce daí em diante, e também nenhum dos *proxies* mostra comportamento similar.

Tendo em vista tais observações, no caso da demanda por eletricidade residencial, a escolha mais adequada para projetar a evolução futura parece ser o crescimento populacional. Quanto à lenha e GLP, tendo em vista que são combustíveis utilizados sobretudo para cocção, a Figura 4.6 mostra que tendem a ter comportamentos opostos. Ou seja, de maneira geral, o consumo doméstico de lenha cresce quando decresce o consumo de GLP, e vice versa. Essas

variações na demanda relativa desses dois combustíveis provavelmente decorrem de variações de preços relativos. Em nossa modelagem, tal como ocorre com a lenha, as variações de GLP no período estudado são explicadas pelo aumento da população.

#### 2.1.2. Tecnologias/Medidas de mitigação consideradas

Não serão propostas medidas de mitigação das emissões resultantes do consumo de energia nos setores Residencial, Comercial, Público e Agropecuária.

#### 2.1.3. Apresentação e descrição das principais bases de dados utilizadas

A principal base de dados utilizada foram as matrizes do Balanço Energético Nacional, produzido pela EPE. Utilizou-se também dados do IBGE e consultas ao IPEADATA, e ao relatório AR5 do IPCC e aos dados da ANP.

#### 2.1.4. Referências bibliográficas

ANP: <http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/precos-ao-consumidor>

BEN/EPE: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>

IBGE: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/9171-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios-continua-mensal.html?=&t=resultados>

IPCC/AR5: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_Chapter08\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf)

IPEADATA: <http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>

### 3. Descrição da incorporação da proposta do Componente 1

Não se aplica

### 4. Descrição dos resultados a serem informados ao Componente 2B

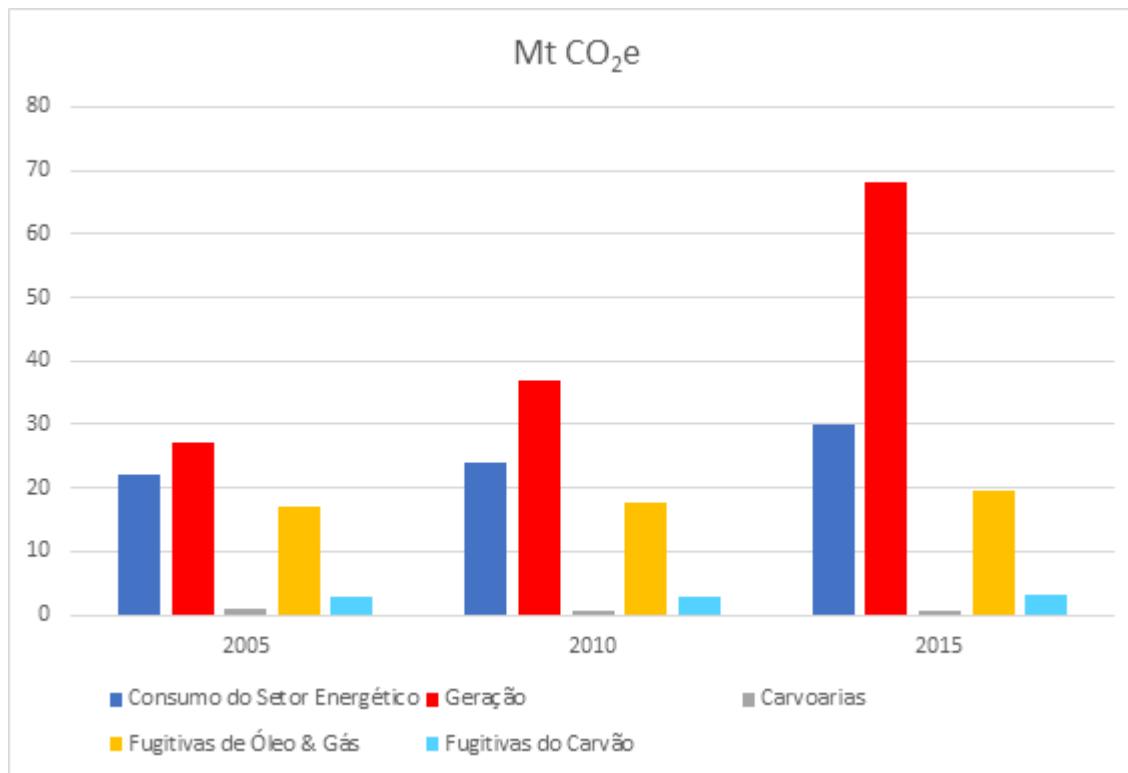
Não se aplica

## V- Oferta de Energia

### 1. Introdução

O setor de oferta de energia contempla as atividades associadas à produção de energia no Brasil. Neste setor, estão representadas as tecnologias de geração e transformação de energia, tais como usinas de energia elétrica, refinarias, destilarias, extração e produção de petróleo, carvão e gás natural, entre outras.

As principais fontes de emissão desse setor são a geração de eletricidade e o consumo energético do próprio setor. A geração de eletricidade tinha uma participação de 39% no total em 2005, subiu para 45% em 2010 e chegou a 56% em 2015. Um crescimento de 152% no período 2005-2015. As emissões do consumo do setor energético cresceram 36% no mesmo período. As emissões fugitivas de óleo e gás são também bastante relevantes, representando 16% do total de 2015 e tendo crescido 15% no período 2005-2015. A Figura 13 apresenta os valores.



**Figura 13.** Emissões do setor energético (2005, 2010 e 2015)

Fonte: A partir de MCTIC (2017, 4<sup>a</sup> edição)

Nota: Valores ajustados para o GWP do AR5.

Para a representação de todo o sistema energético brasileiro, será utilizado o modelo computacional Matriz, desenvolvido pelo Cepel.

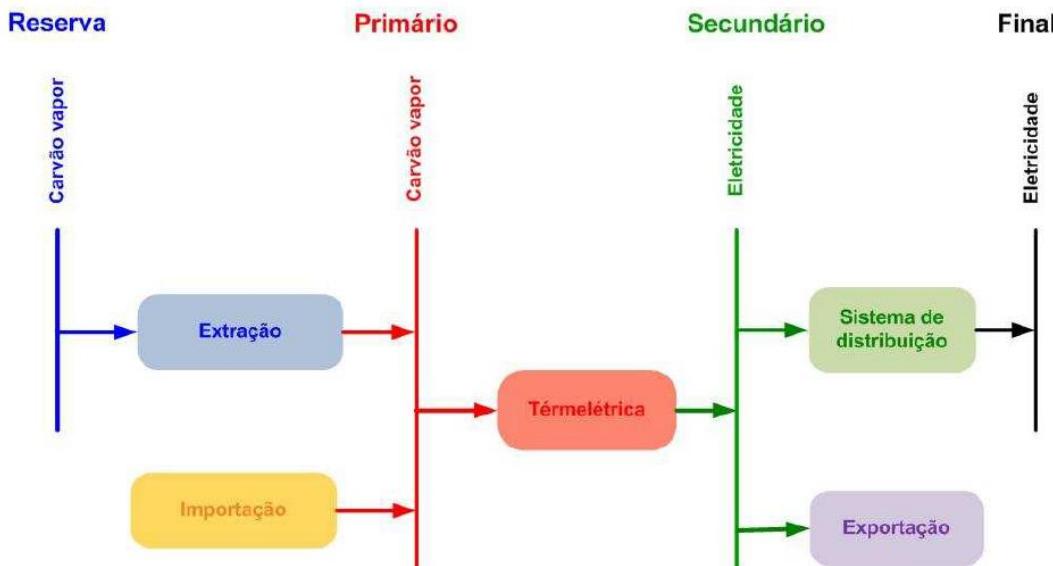
## 5. Metodologia

### 5.1. Modelagem setorial

#### 5.1.1. Descrição do modelo

O Modelo de Projeção de Matriz Energética (MATRIZ) foi concebido como uma ferramenta de apoio a estudos de planejamento da expansão do sistema energético a longo prazo, como os Planos Nacionais de Energia (PNE), elaborados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Resumidamente, um sistema energético pode ser descrito como um conjunto de reservas de energia primária e um conjunto de “tecnologias especializadas” capazes de transformá-las em serviços energéticos. As transformações ocorrem de forma encadeada, passando por vários níveis de energia: primário, secundário, final e útil. A cada nível de energia são definidas as formas de energia as quais serão transformadas em outras através de tecnologias (usinas de energia elétrica, destilarias, carvoarias, refinarias, UPGNs, entre outras) como é ilustrado na Figura 14.



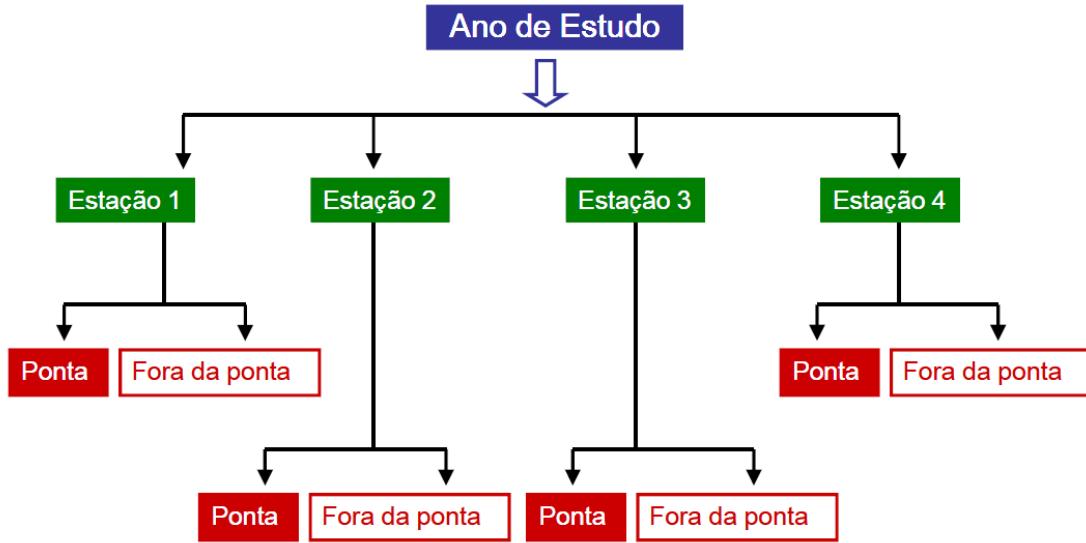
**Figura 14.** Diagrama esquemático da cadeia do carvão (exemplo simplificado).

Fonte: DEA/CEPEL, 2016

O modelo MATRIZ é um modelo computacional *bottom-up* de grande porte, baseado em programação linear, que recebe como *input* exógeno os dados relativos à evolução da demanda de energia final dos diferentes energéticos e disponibilidade de recursos das fontes primárias, secundárias e finais, assim como, as características básicas das tecnologias de transformação, obtendo como resultado os valores das capacidades de produção de energia elétrica e de combustíveis e o valor ótimo dos fluxos energéticos em todas as cadeias energéticas consideradas, incluindo eventuais importações e exportações, a cada período, para todo o horizonte de estudo. Cabe observar que, na definição do problema de otimização da expansão, alguns acréscimos de capacidade de produção e/ou transporte de energia (elétrica ou combustíveis) podem ser admitidos como dados de entrada exógenos.

A duração de cada período é definida pelo usuário, podendo ser de um ou mais anos. O uso de mais anos por período permite simplificar o problema de otimização e é especialmente útil em estudos de longo prazo. Cada período é detalhado por quatro estações do ano e, em cada estação, há dois patamares: ponta e fora de ponta (Figura 2). Esses detalhamentos são úteis principalmente para a representação da operação do sistema elétrico, cujas demanda e oferta são fortemente sazonais.

O modelo MATRIZ procura encontrar, dentre as inúmeras “soluções viáveis” do problema de otimização da expansão, aquela que minimiza o valor presente do custo total de investimento e de operação do sistema energético, também denominada “solução ótima” (podendo haver mais de uma solução de custo mínimo). Define-se como solução viável do problema, qualquer alternativa de oferta dos diversos energéticos capaz de suprir as demandas de energia previstas para o cenário (demandas de eletricidade por subsistema, combustíveis por tipo, etc.), satisfazendo a todas as demais restrições fornecidas (limites de capacidade das fontes de geração de energia elétrica, fatores de capacidade mínimo e máximo por fonte, limites de transporte entre regiões, capacidade de processamento e perfis de refino das refinarias existentes e novas, limites de capacidade de processamento, importação e/ou regaseificação de gás natural, disponibilidade de bagaço de cana para geração termelétrica, etc.). De forma a considerar as variações sazonais e diurnas, o consumo e produção de energias primárias ou secundárias são feitos por estação do ano e/ou patamar de carga (Figura 15).



**Figura 15.** Variações diurnas e/ou sazonais.

Fonte: DEA/CEPEL, 2016

De modo geral, as tecnologias são representadas de forma agregada, visto que a representação individualizada aumentaria significativamente a complexidade da análise integrada das cadeias energéticas. Vale ressaltar que, para o sistema energético brasileiro, a análise integrada torna-se cada vez mais importante em função da perspectiva de expansão da produção de cana-de-açúcar para produção de etanol e da oferta de gás natural com a exploração das reservas do pré-sal. A expansão destas cadeias impacta a cadeia de petróleo, pela competição entre o etanol e derivados de petróleo nos meios de transporte e a cadeia de eletricidade, através das plantas de cogeração de bagaço de cana e termelétricas a gás natural.

Estudos de longo prazo utilizando o modelo MATRIZ permitem definir uma estratégia de expansão das cadeias energéticas considerando as suas interdependências, restrições ambientais e políticas de governo. Esta estratégia pode, então, ser levada aos planejamentos setoriais de expansão, para obter um planejamento mais detalhado, levando-se em conta as características técnicas, econômicas e de impactos ambientais dos projetos individuais das tecnologias.

Os impactos são modelados através da decomposição em componentes síntese do sistema socioambiental. O modelo permite que seja especificada a quantidade de gases de efeito estufa produzidos por cada tecnologia. Também é possível inserir na função objetivo uma penalidade pela emissão de determinado gás. Dessa forma, é possível representar a precificação

de carbono internamente no modelo, bastando para isso, definir como penalidade por tonelada de “CO<sub>2</sub> equivalente emitida” o preço considerado para a emissão de carbono.

A utilização do modelo MATRIZ permite simular cenários de expansão otimizada da capacidade de produção de todas as fontes de energia disponíveis no país no horizonte de 2030 e consolidar projeções da Matriz Energética Brasileira consistentes com as premissas gerais estabelecidas na definição dos cenários considerados: *Pacote Base, Pacote Distributivo, Pacote Ajuste Fronteira, Pacote Segmentado, Pacote sem Diesel e GLP e Pacote sem Agropecuária*.

Como consequência, é possível fornecer ao modelo macroeconômico IMACLIM resultados mais precisos acerca da evolução do consumo dos diversos energéticos, assim como, do tipo de investimento necessário para a expansão da oferta das diversas fontes de energia, capaz de satisfazer este crescimento das demandas em cada cenário considerado.

O modelo também permite visualizar a expansão da capacidade instalada de cada tecnologia no horizonte de 2030, bem como a oferta de energia anual e as respectivas emissões de poluentes atmosféricos.

### 5.1.2. Tecnologias/Medidas de mitigação consideradas

Com relação às medidas de mitigação de emissões no setor de energia, as principais alternativas analisadas foram as fontes de energia renovável utilizadas para a sua expansão. Este item traz um resumo do funcionamento destas tecnologias e enfatiza os principais pontos considerados no estudo.

#### 5.1.2.1. Eólica

A geração de eletricidade através da energia eólica, consiste na conversão da energia cinética do vento com o emprego de turbinas de forma que não há emissão de gases de efeito estufa (GEEs) durante sua operação. O uso deste tipo de energia se tornou relevante nos últimos anos por conta do grande incentivo proveniente das preocupações ambientais e independência energética. O significativo avanço tecnológico e o aparecimento expressivo de fabricantes provocaram uma redução nos custos, aumento da eficiência e melhoria na confiabilidade dos aerogeradores.

Este tipo de geração pode ser separada em dois tipos, de acordo com seu local de instalação, “onshore” (em terra) ou “offshore” (no mar). Nos cenários estudados, somente a tecnologia onshore foi considerada para a expansão, pois no horizonte considerado, os projetos

de usinas eólicas no mar ainda apresentam uma baixa competitividade no Brasil. A energia eólica onshore vem ganhando grande representatividade na matriz elétrica brasileira, apresentando um baixo custo relativo nos leilões (EPE, 2016). Outro incentivo importante é a complementariedade entre a geração hidrelétrica e a geração eólica, levando em consideração que na região Nordeste o maior potencial eólico ocorre quando há menor disponibilidade hídrica (ANEEL, 2015).

#### **5.1.2.2. Solar Fotovoltaica**

A energia solar fotovoltaica é obtida por meio da conversão direta da energia eletromagnética da radiação solar em eletricidade e tem como base o efeito fotovoltaico, que proporciona o aparecimento de uma diferença de potencial pela absorção da luz na célula fotovoltaica. Uma das suas principais vantagens é a facilidade de instalação dos painéis e a flexibilidade de localização, principalmente no caso da geração distribuída. Assim como a eólica, é uma tecnologia limpa, pois durante a conversão de eletricidade não há a emissão de gases de efeito estufa e poluentes.

Este tipo de energia ainda representa uma pequena parcela da matriz energética global, mas merece destaque por sua perspectiva positiva. Há uma forte tendência de expansão da sua capacidade instalada impulsionada por uma redução de custos, avanços tecnológicos e pressões ambientais. O Brasil apresenta grande potencial para a utilização de energia fotovoltaica devido às suas características naturais favoráveis, tais como um alto nível de incidência solar (EPE 2016) e grande área disponível.

#### **5.1.2.3. Hidrelétrica**

A hidroeletricidade tem sido a principal fonte de geração de energia elétrica no Brasil ao longo das últimas décadas. Esse panorama se dá, principalmente, pela sua competitividade em termos econômicos e pela abundância dos recursos hídricos no país. É uma fonte renovável, não emissora de gases de efeito estufa e com elevada vida útil. Ademais, quando associada a grandes reservatórios, possui grande flexibilidade operativa. É uma tecnologia madura e segura, e que apresenta a vantagem adicional de ser uma fonte renovável com boa capacidade de armazenamento local (ou regularização), muito útil para a operação do sistema interligado nacional.

Do ponto de vista técnico, a energia produzida em uma usina hidrelétrica provém da energia potencial gravitacional, gerada pelo desnível entre volumes de água. Uma usina é composta, basicamente, de uma barragem, sistemas de captação e adução de água, casa de força

e vertedouros. Neste estudo também foram consideradas pequenas centrais hidrelétricas (PCH) como tecnologias disponíveis à expansão. O funcionamento de uma PCH é semelhante ao de uma usina hidrelétrica e, basicamente, o que define sua classificação é sua potência instalada reduzida e o tamanho de seu reservatório. Outra diferença é que, com algumas exceções, as hidrelétricas não classificadas como PCH são despachadas pelo ONS, enquanto as PCH não o são.

#### **5.1.2.4. Bioeletricidade**

Esta medida de mitigação aborda a geração de energia elétrica a partir da biomassa, a chamada bioeletricidade. A queima de biomassa emite CO<sub>2</sub> na atmosfera, porém esse CO<sub>2</sub> já foi retirado da atmosfera durante o crescimento da biomassa. Por esse motivo, considera-se que a emissão líquida de CO<sub>2</sub> dessa tecnologia é nula. Há porém, emissão de outros gases de efeito estufa, como CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. Entretanto, o total emitido nesse processo, em termos de CO<sub>2</sub>e/MWh é muito menor do que o proveniente de fontes fósseis de energia.

Nesta categoria, o principal insumo utilizado para geração elétrica no Brasil é o bagaço de cana. A sua participação vem se tornando bastante expressiva, em função do crescimento da indústria de etanol e açúcar. No âmbito nacional, a bioeletricidade é obtida, principalmente, através de cogeração, ou seja, geração combinada de energia térmica e elétrica. Essa geração ocorre, em sua maioria, em unidades industriais sucroenergéticas e, em menor proporção, no setor de papel e celulose, tendo como fonte a lixívia (EPE, 2016). Além disso, o uso da lenha de florestas plantadas para geração elétrica também tem potencial de ocupar uma parcela relevante na bioeletricidade.

Outros tipos de biomassa, além do bagaço, da lixívia e da lenha, podem ser utilizadas para geração elétrica, no entanto, a quantidade destes insumos ainda é muito pequena no Brasil, o que fez com que sua representação neste estudo seja feita de forma agregada.

#### **5.1.2.5. Gás natural**

Apesar do gás natural ser uma fonte fóssil e emissora de gases de efeito estufa, seu uso pode ser considerado uma medida de mitigação, caso venha a substituir um energético com maior teor de carbono, como, por exemplo, o carvão mineral. A ampliação do uso de energias renováveis intermitentes no setor de oferta de energia traz a necessidade de expansão de capacidade instalada de usinas flexíveis para complementar a geração, como é o caso das termelétricas a gás natural de ciclo aberto. No Brasil, além dos aspectos ambientais, o aumento da capacidade instalada dessas usinas pode ser impulsionado pelo aumento da disponibilidade de gás

natural no mercado nacional devido ao desenvolvimento das reservas de petróleo e gás no Pré-sal (PNE, 2018).

#### **5.1.2.6. Biocombustíveis**

Os biocombustíveis são derivados de biomassa e podem ser utilizados como substitutos dos combustíveis fósseis em motores a combustão e na geração de eletricidade. A biomassa é uma fonte de energia limpa e renovável e pode vir a ter grande importância na mitigação das mudanças climáticas. No Brasil, os dois principais biocombustíveis líquidos utilizados são o etanol de cana-de-açúcar e o biodiesel, que é produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais. Assim como a geração de bioeletricidade, o uso de biocombustíveis não emite CO<sub>2</sub> em termos líquidos, porém pode emitir outros gases de efeito estufa.

As políticas públicas adotadas nos últimos anos, associadas às condições naturais do Brasil, possibilitaram a expansão dos biocombustíveis na matriz energética. Destacam-se o Programa Nacional do Álcool (1970), a inserção da tecnologia flex fuel (2003), e o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (2005). Mais recentemente, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), revela outras grandes oportunidades para o Brasil e pode fomentar o aumento da produção e uso dos biocombustíveis no Brasil (EPE, 2018). Além disso, num horizonte maior, outros biocombustíveis podem se tornar comercialmente viáveis, como o bioquerosene e o bio-óleo.

#### **5.1.2.7. Nuclear**

As usinas nucleares utilizam o calor gerado pela fissão nuclear para aquecer a água existente no interior dos reatores a fim de produzir o vapor que movimenta as turbinas. Desde os acidentes de Three Mile Island (1979), Chernobil (1986) e, mais recentemente, Fukushima (2011), esse tipo de energia vem sofrendo uma desaceleração de sua expansão devido aos altos custos de geração e preocupações ambientais (EPE, 2007).

As usinas nucleares não emitem gases de efeito estufa durante sua vida útil, sendo essa uma de suas grandes vantagens. Além disso, não são influenciadas pela variação de preços de petróleo no mercado internacional. Como desvantagem, há a questão do armazenamento definitivo dos rejeitos radiativos. Outro problema, é o fato de sua operação ser pouco flexível, sendo que a tendência atual é a necessidade de usinas mais flexíveis para complementação do sistema às fontes intermitentes.

No Brasil, existem duas usinas nucleares em operação (Angra I e Angra II) e uma terceira em construção (Angra III). Nos cenários estudados, considerou-se a conclusão das obras de Angra III no horizonte de 2030, porém, não foi considerada nenhuma expansão adicional de geração nuclear neste horizonte, devido às limitações ambientais e elevado tempo de construção.

#### **5.1.2.8. *Heliotérmica***

A energia heliotérmica, assim como a fotovoltaica, utiliza a energia proveniente da radiação solar. No entanto, essa tecnologia pode ser descrita como uma forma de geração termelétrica, pois a energia solar incidente é convertida em energia térmica e posteriormente em energia elétrica. Uma usina heliotérmica utiliza espelhos para concentrar a irradiação direta solar em um ponto focal onde se encontra um receptor com um fluido que será aquecido. A partir deste ponto, a usina funciona de forma similar a uma termelétrica convencional e os fluidos aquecidos gerarão energia elétrica através de um conjunto turbina-gerador.

Esta tecnologia não emite gases de efeito estufa, exceto por eventuais usos do sistema de *backup*, que pode ocorrer para evitar o resfriamento dos fluidos usados para o armazenamento térmico.

Se comparada a geração fotovoltaica, a energia heliotérmica apresenta como vantagem uma menor vulnerabilidade na geração e a possibilidade de funcionar com um sistema de armazenamento térmico de energia. Dessa forma, sua produção de energia é parcialmente controlável, provendo mais serviços ao sistema do que usinas fotovoltaicas e eólicas. Porém, essa fonte renovável ainda possui custos elevados, o que impacta diretamente sua perspectiva de expansão (EPE, 2016).

#### **5.1.2.9. *Redução do flaring e venting em atividades de E&P***

O CO<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub> são os gases que mais contribuem para as emissões do setor de E&P e são provenientes, principalmente, de *venting* e *flaring*. *Venting* pode ser descrito como o processo de liberação de gases (gás natural, vapores de hidrocarbonetos, vapor d'água e outros gases) de forma controlada para a atmosfera, e o *flaring*, é a queima de gás em sistemas de tocha. O *venting*, em comparação ao *flaring*, é uma atividade que libera grandes volumes de CH<sub>4</sub>, um gás que apresenta um maior impacto sobre a mudança climática que o CO<sub>2</sub>, sendo, portanto, geralmente evitado. Desta forma, nos cenários propostos neste estudo, os esforços de mitigação buscaram reduzir as tendências atuais de emissões dessas atividades nas plataformas, diminuindo o percentual emitido por barril de petróleo produzido.

### 5.1.2.10. Controle de emissões fugitivas no processamento e transporte de petróleo e gás natural

Emissões fugitivas são as emissões de gases que ocorrem devido a vazamentos e ou liberação irregular. No refino de petróleo e transporte de gás natural, uma possível medida de mitigação é a adoção, por parte de refinarias e gasodutos, de melhorias no monitoramento e redução de vazamentos a fim de diminuir as emissões fugitivas.

### 5.1.2.11. Resumo

De forma a permitir uma melhor visualização dos impactos das medidas de mitigação, estas foram relacionadas aos principais setores de influência em uma tabela resumo (Tabela 24).

**Tabela 24.** Medidas de mitigação e setores aos quais foram aplicadas

Setor	Medidas de Mitigação									
	Eólica	Solar Fotov.	Hidrelétrica	Bioeletricidade	Gás Natural	Biocombustíveis	Energia Nuclear	Heliotérmica	Redução Flaring e Venting	Controle Vazamentos
Oferta de Energia										
Consumo do Setor Energético					X	X				
Geração de Energia	X	X	X	X	X		X	X		
Emissões Fugitivas									X	X

### 5.1.3. Apresentação e descrição das principais bases de dados utilizadas

A principal base de dados usada foi o Plano Decenal de Energia – PDE 2027, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e Ministério de Minas e Energia (MME). Os custos de investimentos e O&M (operação e manutenção) de usinas de energia elétrica foram baseados nessa publicação e em seus anexos. Além disso, algumas restrições de expansão presentes neste estudo foram consideradas, tais como a expansão máxima para usinas hidrelétricas e PCHs.

Outra base relevante foi a publicação de março de 2019 da International Renewable Energy Agency (IRENA) sobre os custos da geração renovável em 2018 (IRENA, 2019). Os dados foram utilizados para o cálculo dos custos da tecnologia heliotérmica, levando-se em consideração as tecnologias cilindro parabólico e linear fresnel.

Foram também considerados os dados do Banco de Informações da ANEEL (BIG) (ANEEL, 2019) sobre capacidade instalada no Brasil e as informações contidas nas atas das reuniões do CMSE de monitoramento da geração (CMSE, 2019) para estimar a data de operação das usinas selecionadas nos leilões.

A edição de 2018 do Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE, 2018), contendo a contabilidade da oferta e consumo de energia no Brasil, foi utilizada para análise das séries históricas das operações do setor de energia, capacidade instalada, reservas de energia e dados sobre os principais indicadores energéticos de importação, exportação, produção e consumo, por região brasileira.

#### 5.1.4. Referências bibliográficas

ANEEL. BIG - Banco de Informações de Geração. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 2 ago. 2019.

CMSE. Anexo - Datas de Tendência - 3a Reunião de Monitoramento da Geração de 2019 -

21/03/2019. 2019. Disponível em:

<[http://www.mme.gov.br/documents/10584/137631601/Anexoo+2\\_Datas+de+Tend%C3%A3o+das+Usinas+-+217%C2%AA+Reuni%C3%A3o+CMSE+%2810-04-2019%29.pdf/fc6d535b-efbe-465c-aaf2-64f1303caf3c](http://www.mme.gov.br/documents/10584/137631601/Anexoo+2_Datas+de+Tend%C3%A3o+das+Usinas+-+217%C2%AA+Reuni%C3%A3o+CMSE+%2810-04-2019%29.pdf/fc6d535b-efbe-465c-aaf2-64f1303caf3c)>.

DEA/CEPEL. Manual de Metodologia do Modelo MATRIZ Versão 4.0.0. 2016.

EPE. Análise de Conjuntura de Biocombustíveis - Ano 2019. 2018

EPE. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). 2016.

EPE.Balanço Energético Nacional. 2019

EPE. Mudanças Climáticas e Desdobramentos sobre os Estudos de Planejamento Energético: Considerações Iniciais. 2018.

EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2027. 2018.

EPE. PNE 2030 - Geração Termonuclear. Disponível em: <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termonuclear.pdf>>. Acesso em: 2 ago. 2019.

IRENA, Renewable Power Generations Costs in 2018, disponível em: <[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA\\_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf)>, acesso em: 2 ago. 2019.

<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> (BIG acesso 2019)

[http://www.mme.gov.br/documents/10584/137631601/Anexo0+2\\_Datas+de+Tend%C3%A3ncia+das+Usinas++217%C2%AA+Reuni%C3%A3o+CMSE+%2810-04-2019%29.pdf/fc6d535b-efbe-465caaf2-64f1303caf3c](http://www.mme.gov.br/documents/10584/137631601/Anexo0+2_Datas+de+Tend%C3%A3ncia+das+Usinas++217%C2%AA+Reuni%C3%A3o+CMSE+%2810-04-2019%29.pdf/fc6d535b-efbe-465caaf2-64f1303caf3c) (Ata Anexo - Datas de Tendência - 3ª Reunião de Monitoramento da Geração de 2019 - 21/03/2019)

<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2027> (PDE 2027)

<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termonuclear.pdf> (EPE 2007)

[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-402/An%C3%A1lise\\_de\\_Conjuntura\\_Ano%202018.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-402/An%C3%A1lise_de_Conjuntura_Ano%202018.pdf) (EPE 2018)

<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Mudancas%20Climaticas%20e%20Planejamento%20Energetico.pdf> (PNE 2018)

## 6. Descrição da incorporação da proposta do Componente 1

### 6.1. Modelagem Setorial

#### 6.1.1. Descrição da modelagem dos elementos propostos pelo Componente 1

As emissões representadas no modelo Matriz são as provenientes das usinas termelétricas, das carvoarias, do consumo do setor energético e das emissões fugitivas da indústria de petróleo e gás. Desta forma, as emissões da queima de combustíveis no consumo final não são contabilizadas no setor de oferta de energia e são tratadas pelo setor onde ocorre esse consumo final. Dessa forma, o cenário “Sem diesel e GLP” terá impacto apenas na alteração de demanda desses combustíveis e no preço do diesel usado para as usinas termelétricas abastecidas com óleo diesel.

No caso das usinas termelétricas, a precificação de carbono aumentará o Custo Variável Unitário (CVU) da usina, fazendo com que o seu despacho pelo ONS (Operador Nacional do Sistema) seja menos provável. Com isso, pode ser necessária a expansão de novas usinas ou a operação mais frequente de usinas com CVU menor. Ressalte-se que, independentemente de a precificação de carbono ser realmente cobrada ou ser apenas considerada como um “preço-sombra”, seu impacto no despacho e, consequentemente, nas simulações do modelo Matriz será o mesmo, de forma que não há alteração nas formas de simulação dentro do modelo.

De forma a melhor ilustrar os pontos contemplados na modelagem, foi construída a Tabela 25, a qual apresenta um resumo das premissas adotadas por categoria. Para cada premissa, há uma descrição do que foi possível ser plenamente contemplado na modelagem, o que foi simplificado/adaptado no modelo Matriz.

**Tabela 25.** Descrição da modelagem dos elementos propostos[SA1]

	Premissas	Modelagem	Comentários
<b>Escopo Setorial</b>	Consumidores de Combustíveis	Plenamente	
<b>Gases</b>	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	Plenamente	
<b>Escopo de emissões</b>	Emissões dos combustíveis e fugitivas	Plenamente	
<b>Período</b>	Anual	Plenamente	
<b>MRV (PoMuC)</b>	Reporte anual para todos os agentes regulados, com verificação de terceira parte.	Não aplicável	
<b>Limiares de regulação</b>	Distribuidoras e importadoras de combustíveis: .	Plenamente	
<b>Pontos de regulação</b>	Distribuidoras e importadoras de diesel, gasolina, óleo combustível, GLP, querosene de aviação, gás natural, usinas de carvão mineral e coqueiras	Plenamente	
<b>Instrumento de precificação</b>	Tributo	Plenamente	
<b>Alocação das permissões/isenções da base tributária</b> <b>Isenções</b>	Isenção da base tributária	Plenamente	
	Exportações; Nafta petroquímica, destinada à elaboração de petroquímicos	Plenamente	
<b>Proteção à competitividade</b>	Isenção de exportações + ajuste de fronteira para as importações referentes aos setores regulados + na primeira fase: 10% de alocação adicional para setores em risco de competitividade (custo de controle > 10% do custo de produção ou intensidade de comércio > 10% ou combinação >15%); da segunda em diante 10% para setores em alto risco (custo de controle >15% ou intensidade comercial > 15% ou combinação >20%) e 5% para setores em médio risco (10% < c.c. ou i.c. < 15% ou 15% < combinação < 20%); além da proteção de exportações.	Plenamente	Modelado no IMACLIM
<b>Base de cálculo</b>	Combustíveis: Emissões estimadas diretamente de parâmetros de conteúdo de CO <sub>2</sub> equivalente, Tier 1 do Inventário Nacional, do volume de venda dos combustíveis	Plenamente	
<b>Valor referencial</b>	Tributo de R\$ 30/tCO <sub>2</sub> e (US\$ 10 - média internacional)	Plenamente	
<b>CAP</b>	Compatível com um preço de R\$ 30/tCO <sub>2</sub> e da permissão, para tornar	Plenamente	

	Premissas	Modelagem	Comentários
	comparáveis os cenários ou esforço de redução percentual igual entre os setores regulados, atingindo a redução overall do cenário base.		
<b>Mecanismos de controle de preços</b>	Fase inicial: preço teto de R\$ 30/tCO <sub>2</sub> e e preço piso de R\$ 20/tCO <sub>2</sub> e; Reserva de estabilidade com 10% das permissões a serem vendidas a R\$ 30 em caso de alcance do teto; reserva de novos entrantes com 5% das permissões.	Plenamente	Não haverá a necessidade de implementar o mecanismo de controle de preços por se tratarem de modelos determinísticos
<b>Offsets</b>	Offsets nacionais de CRA e de projetos de MDS com MRV certificado, com uso restrito a 20% do montante total por agente regulado. Da segunda fase em diante, tal limite cairia para 10%.	Plenamente	Será usada a curva de oferta de offsets que será fornecida pelo Componente 1
<b>Penalização</b>	Mercado: Multa de R\$ 100 mil (ou 5% da média de faturamento da empresa regulada nos últimos 2 anos), ajustada pelo IPCA; além da obrigação de comprar permissões no montante de: (i) fase inicial - uma vez a quantidade não cumprida; (ii) fases seguintes: três vezes a quantidade não cumprida; Multa de R\$ 200 mil pela falsidade ou não observância das regras de relato, dobrando em caso de reincidência. Possibilidade de aplicação da lei de crime ambiental. Tributo: De acordo com a legislação tributária.	Não considerado	Deverá ser analisado pelo Componente 2B
<b>Uso das receitas</b>	Redução correspondente da alíquota do INSS (tributo neutro), Compensações fiscais à União e aos Estados pelo fim da CIDE combustíveis, Compensações distributivas via BF.	Plenamente	Simulado no IMACLIM
<b>Ajuste nos instrumentos setoriais</b>	Zerar CIDE combustíveis, Etiquetagem de energia e veicular para emissões de GEE, Remoção dos subsídios REPENEC e REPEX, Tarifas Binômias no mercado de energia elétrica (EE), Remoção dos subsídios ao carvão mineral, Abertura e adoção de Tarifas Dinâmicas no mercado cativo de EE. Além disso, deve representar o RenovaBio.	Simplificado	Renovabio será contemplado no setor de transportes. CIDE comustíveis será zerada no IMACLIM. Tarifas binômias não podem ser representadas

## 7. Descrição dos resultados a serem informados ao Componente 2B

### 7.1. Modelos setoriais

#### 7.1.1. Descrição das limitações de modelagem dos elementos propostos pelo Componente 1

Algumas características mais detalhadas não podem ser representadas no modelo Matriz, devido a simplificações na representação dos sistemas energéticos. Por exemplo, o uso de tarifas binômias para energia elétrica pode alterar, entre outras coisas, a demanda desse energético e a velocidade de expansão da geração distribuída. No entanto, a demanda é um dado exógeno ao modelo Matriz, de modo que a tarifação no consumidor final não é representada separadamente. Assim, esta forma de cobrança deve ser avaliada qualitativamente no componente 2B.

Da mesma forma, o impacto da adoção de tarifas dinâmicas de energia elétrica, em que os preços podem variar de acordo com a oferta e demanda de cada momento, não pode ser avaliado com as ferramentas usadas neste estudo. Além de parte desse impacto ocorrer na resposta da demanda, o modelo Matriz não possui granularidade temporal suficiente para representar as variações de curto prazo que a avaliação desse tipo de tarifa requer.

A remoção dos subsídios ao carvão mineral nacional faria com que as antigas usinas a carvão que recebem esse subsídio deixassem de ser competitivas e, portanto, na prática, deixariam de operar. Assim, uma forma de se verificar o impacto dessa medida, mais simples do que aumentar o custo variável unitário (CVU) das mesmas, é através da simulação da operação do sistema sem incluir essas usinas<sup>14</sup>.

---

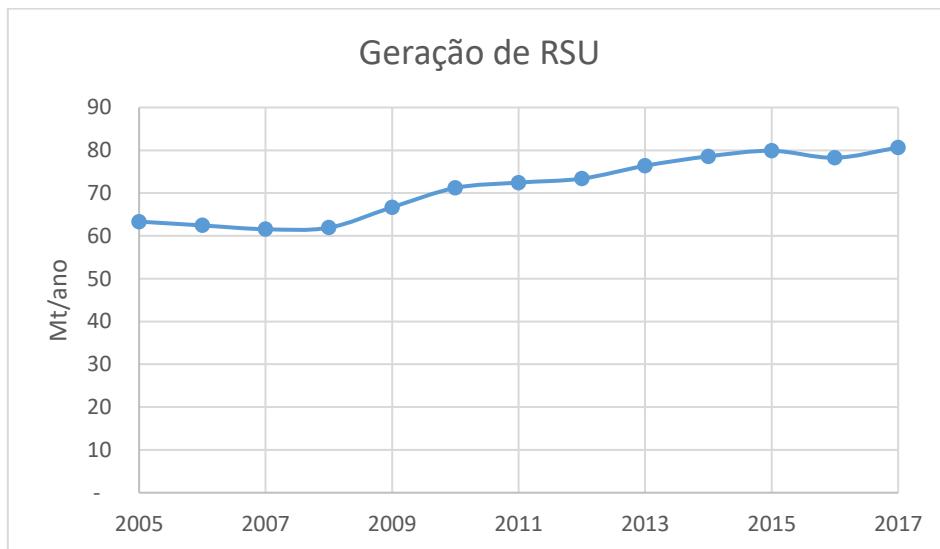
<sup>14</sup> Observe-se que a retirada completa dos subsídios ao carvão nacional implicaria que as usinas a carvão existentes nunca mais seriam "despachadas economicamente" (acima de sua inflexibilidade) pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Sendo assim, é possível representar essa remoção dos subsídios ao carvão nacional de uma forma simplificada, desprezando-se a inflexibilidade das usinas (geração mínima) e removendo-se essas antigas termelétricas da configuração do parque gerador. O resultado em termos de operação do sistema é praticamente o mesmo.

## vi - Resíduos

### 1. Introdução

O Setor de Resíduos é dividido em dois principais subsetores: resíduos sólidos e águas residuais. No subsetor de resíduos sólidos, a análise inclui resíduos urbanos (RSU), industriais (ISW) e serviços de saúde (HSW), todos da classe II-A (não perigosos e não inertes). Resíduos perigosos não são considerados, pois são armazenados de acordo com a legislação e normas específicas, cujos tratamentos não emitem GEE, exceto a incineração. No subsetor de águas residuais, a análise considera os esgotos domésticos e comerciais, bem como os efluentes industriais orgânicos.

De acordo com o Panorama Nacional de Resíduos Sólidos (ABRELPE, 2017), foram gerados aproximadamente 78 Mt de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em 2016, um aumento de 24% desde 2005. A Figura 16 mostra a evolução dos RSU produzidos nos últimos anos.



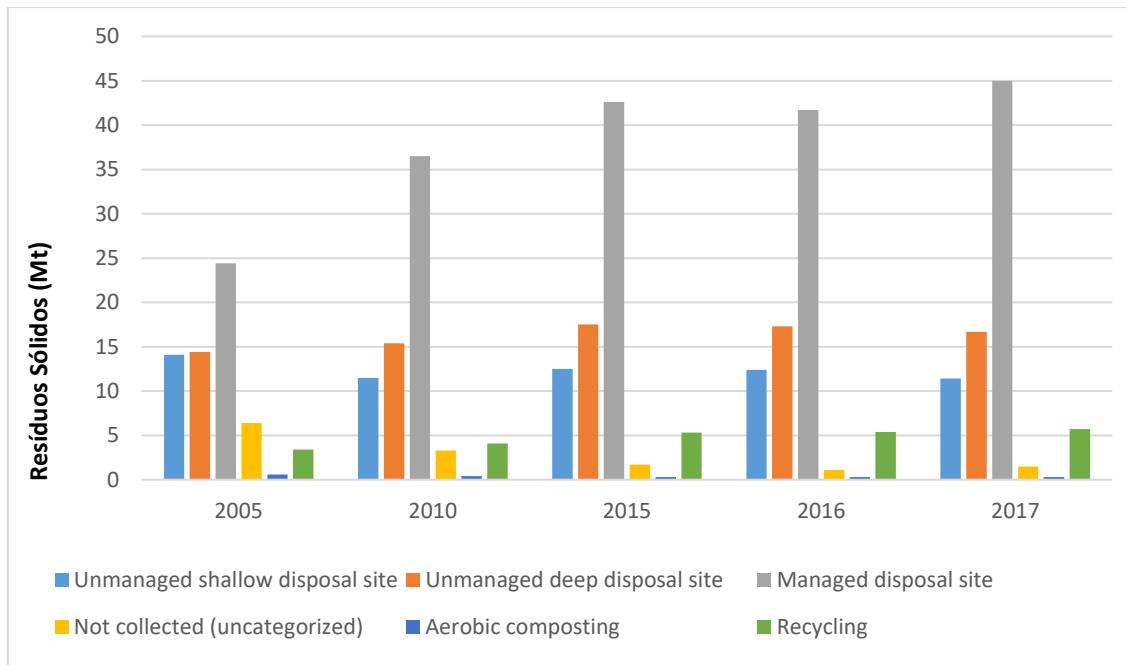
**Figura 16.** Geração de Resíduos Sólidos Urbanos (Mt/ano)

Fonte: Projeto ICAT (2019), a partir de ABRELPE (2005, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017), estimado.

Em 2016, a geração média de resíduos foi de 1,040 kg / hab.dia com eficiência de coleta de 91%, portanto, uma taxa de coleta de 0,948 kg / ha.dia (ABRELPE, 2017). Esse valor varia de

acordo com as regiões, estados e municípios, de acordo com o nível de renda da população. No Estado do Rio de Janeiro, por exemplo, a média é de 1,295 kg / hab.dia e na cidade do Rio de Janeiro aumenta para 1,861 kg / hab.dia.

Ainda de acordo com a ABRELPE (2017), cerca de 60% do lixo coletado no país são descartados em aterros, uma porcentagem ainda abaixo das metas estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos que determinou que os aterros não gerenciados fossem fechados em agosto de 2014. A Figura 17 mostra a evolução do subsetor de resíduos sólidos nos últimos anos.



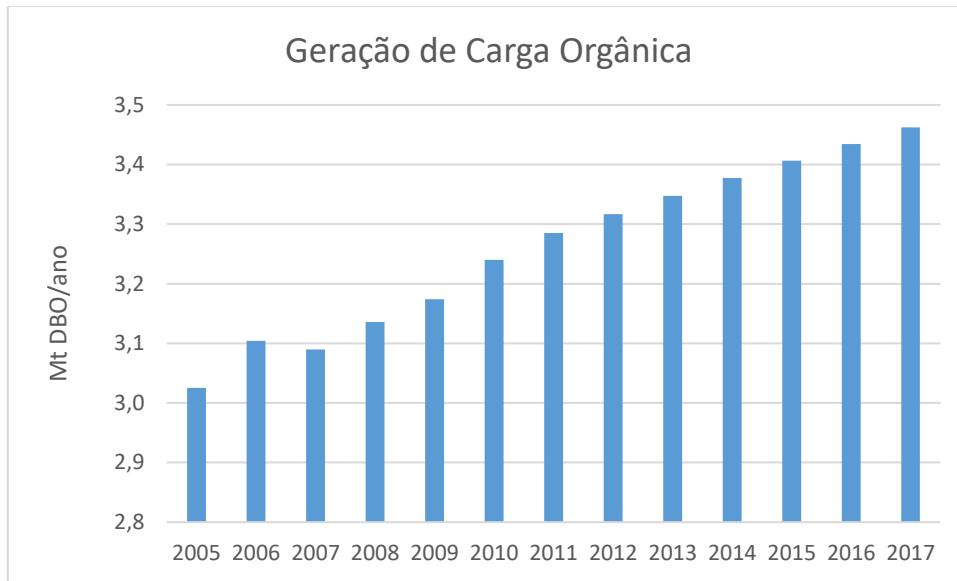
**Figura 17.** Destinação de resíduos sólidos no Brasil entre 2005 e 2017 (MT)

Fonte: Projeto ICAT (2019)

Os locais de disposição de resíduos sólidos, não gerenciados, semi-gerenciados, gerenciados ou até não classificados, produzem gases de efeito estufa, principalmente metano ( $\text{CH}_4$ ), por meio da decomposição anaeróbica da matéria orgânica. Essa condição faz com que um aterro gerenciado gere mais  $\text{CH}_4$  do que um site não gerenciado aberto.

Os tratamentos térmicos são fontes de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$  e tratamentos biológicos de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ . A incineração é comumente usada para o tratamento de resíduos sanitários (HSW) e industriais (ISW). A reciclagem ainda tem uma contribuição modesta para evitar emissões, mas inclui apenas papel, papelão e madeira.

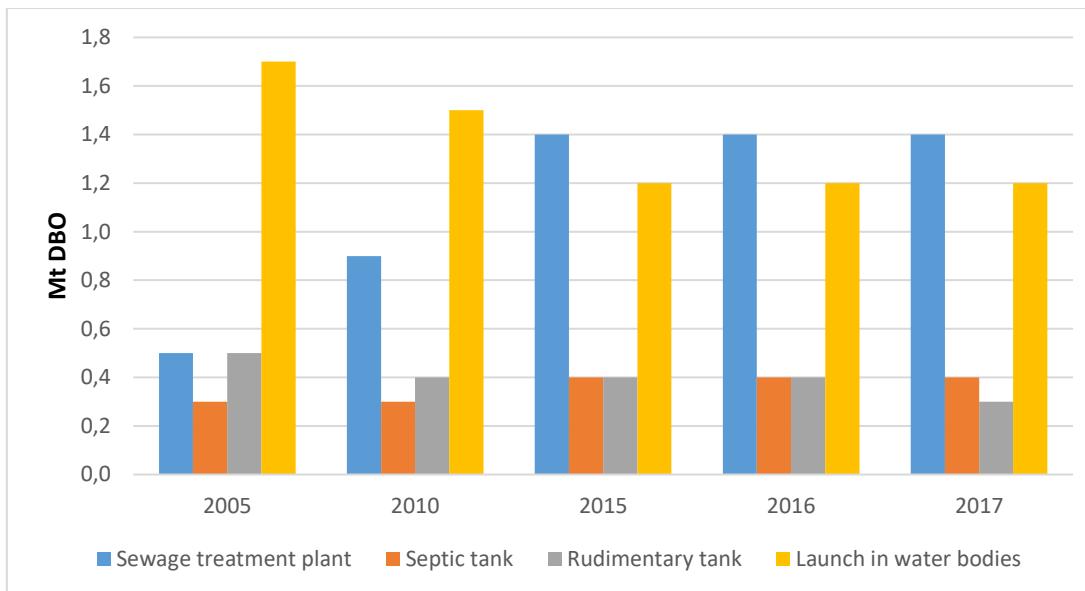
No caso de esgotos sanitários e efluentes industriais, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), aproximadamente 3,3 Mt de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) - o parâmetro usado para medir o componente orgânico das águas residuais - foram gerados nas áreas urbanas em 2013, um aumento estimado de 10% desde 2005, seguindo o crescimento da população e da indústria. A Figura xxx mostra a evolução estimada da DBO produzida nos últimos anos.



**Figura 18.** Carga orgânica total no Brasil de 2005 a 2017 (Mt BOD)

Fonte: Projeto ICAT (2019) a partir de Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000 (IBGE, 2000); Atlas de Águas Residuais de 2013 (ANA, 2017); 2005 a 2012 e 2014 a 2017 valores estimados.

De acordo com o Atlas de Águas Residuais de 2013 (ANA, 2017), apenas 61% do efluente doméstico urbano são coletados no país e apenas 43% são tratados em usinas centralizadas. A Figura 19 mostra a evolução estimada do subsetor de águas residuais nos últimos anos.



**Figura 19.** Destinação de águas residuais domésticas no Brasil entre 2005 e 2017 (Mt DBO)  
 Fonte: Projeto ICAT (2019) a partir de Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000 (IBGE, 2000); Atlas de Águas Residuais de 2013 (ANA, 2017); 2005 até 2017 estimados

Os sistemas de tratamento de esgoto podem ser classificados como preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar remove sólidos grossos, enquanto o tratamento primário remove sólidos sedimentares. Em ambos, predominam os mecanismos de tratamento físico - grades e deposição - e no tratamento primário, parte da matéria orgânica em suspensão e dos materiais flutuantes é removida (óleos e graxas). No tratamento secundário, os mecanismos são biológicos, uma vez que o principal objetivo desse nível é remover a matéria orgânica por meio da biodegradação por micro-organismos. Os sistemas de tratamento utilizados podem incluir lagoas de estabilização anaeróbica e aeróbica, reatores anaeróbicos, filtros biológicos, lodo ativado, entre outros. O tratamento terciário é usado para processar o efluente em relação a patógenos e outros contaminantes, bem como para fornecer a retirada de nutrientes através de uma ou mais lagoas de maturação, filtração, bioadsorção, troca iônica e processos de desinfecção (VON SPERLING et al., 2005).

Os sistemas de tratamento primário, secundário e terciário produzem lodo. O primário consiste na remoção de sólidos, enquanto o secundário e o terciário incluem crescimento biológico na biomassa e agregação de pequenas partículas. O lodo também deve ser tratado sob

digestão anaeróbica ou aeróbica, densificação, desidratação, compostagem ou disposição final em aterros (IPCC, 2006).

Os tratamentos de águas residuais e de lodo, em condições anaeróbicas, resultam em emissões de CH<sub>4</sub>, com a quantidade variando de acordo com as características do efluente, a temperatura e o tipo de tratamento. O principal fator que define a quantidade de metano a ser produzido é a quantidade de matéria orgânica degradável no esgoto medida por DBO e DQO (demanda química de oxigênio). Quanto maior o DBO ou o DQO, maior a produção de metano. Em relação à temperatura, a produção de metano aumenta, principalmente em climas quentes e em sistemas sem controle adequado desse parâmetro.

O óxido nitroso está associado à degradação dos componentes nitrogenados presentes nos efluentes (uréia, nitrato e proteínas) e outros processos que envolvem o tratamento, principalmente nos sistemas terciários, que podem remover esses compostos nitrogenados. As emissões diretas de N<sub>2</sub>O são geradas nos processos de nitrificação (um processo aeróbico que converte amônia e outros compostos nitrogenados em nitrato - NO<sub>3</sub>) e a desnitrificação (um processo anaeróbico no qual o nitrato é convertido em gás nitrogênio - N<sub>2</sub>), pois são intermediários produtos de ambos os processos. As emissões de N<sub>2</sub>O podem ocorrer tanto em estações de tratamento quanto em corpos d'água onde o efluente é descarregado.

As emissões de metano das estações de tratamento de efluentes industriais refletem a evolução dos segmentos em que os efluentes com carga orgânica significativa (DQO) são tratadas sob condições anaeróbicas. Portanto, as emissões de efluentes industriais são estimadas com uma função que correlaciona a quantidade de matéria orgânica a ser tratada, com a taxa de crescimento do PIB da indústria de alimentos e bebidas. Em 2010, a produção de cerveja representou 62% das emissões, seguida pela indústria de leite cru com 14% (MCTIC, 2015). Embora o “vinhoto”, subproduto da indústria de açúcar e etanol, tenha o maior conteúdo de matéria orgânica em todo o setor industrial, é aplicado diretamente no solo e não produz metano. O N<sub>2</sub>O também é produzido no setor de resíduos industriais.

## 2. Metodologia

### 2.1 Modelagem Setorial

#### 2.1.1 Descrição do modelo

Os modelos utilizados para o cálculo de emissões de GEE dos setores de resíduos sólidos, esgotos domésticos e efluentes industriais são aqueles utilizados pelo IPCC (2006<sup>15</sup>) para inventários de emissões de GEE. No caso de resíduos sólidos, para disposição em aterros sanitários e outros sítios, é utilizado o método de decaimento de primeira ordem (*First Order Decay Method*) que faz uso de dados históricos de disposição de resíduos por tipo de destinação. Para os demais tipos de tratamento como compostagem e incineração (no caso de resíduos hospitalares e industriais) também são aplicados os métodos disponibilizados pelo IPCC (2006). Tais metodologias são aplicadas aos níveis de atividade futura dos cenários relativamente à (i) produção de resíduos (com base em hipóteses de crescimento da população e produção de resíduos per capita), (ii) penetração das medidas previstas na Política Nacional de Resíduos Sólidos, e (iii) hipóteses de adoção de medidas de mitigação aplicáveis ao setor.

No caso de esgotos domésticos e efluentes industriais também se aplicam as metodologias de inventários do IPCC (2006) para o cálculo das estimativas de emissões. Para os níveis de atividade dos cenários no caso de tratamento de esgotos, considera-se (i) produção de carga orgânica (hipóteses de crescimento populacional e de produção de carga orgânica per capita), (ii) penetração de medidas referentes à Política Nacional de Saneamento Básico, e (iii) hipóteses de adoção de medidas de mitigação aplicáveis ao setor. Para os níveis de atividade no caso de tratamento de efluentes industriais são considerados (i) produção industrial estimada em função da evolução do PIB, (ii) a produção de carga orgânica por nível de produção de cada segmento industrial, e (iii) hipóteses de adoção de utilização energética do metano gerado.

#### 2.1.2 Tecnologias/Medidas de mitigação consideradas

- Uso de metano de aterros como fonte energética: implantação de infraestrutura de recuperação de metano;
- Conversão de metano de aterros sanitários em CO<sub>2</sub> (queima em flares);

---

<sup>15</sup> Capítulo 5. Disponível em <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>

- Aumento do volume de compostagem de resíduos orgânicos segregados na fonte;
- Implantação de programas de logística reversa, redução na fonte e coleta seletiva de resíduos;
- Substituição de fossas sépticas por estações de tratamento anaeróbicas;
- Conversão de metano de estações de tratamento de esgotos e efluentes industriais em CO<sub>2</sub> (queima em flares ou utilização como combustível);

### 2.1.3 Apresentação e descrição das principais bases de dados utilizadas

**Tabela 26.** Dados referentes a Resíduos Sólidos (Mt e %)

Nível de Atividade	2005		2010		2015		2016		2017	
	Mt	%	Mt	%	Mt	%	Mt	%	Mt	%
Geração de RSU e RSI	63,3	100,0	71,2	100,0	79,8	100,0	78,3	100,0	80,6	100,0
RSU RSI coletado	52,9	83,5	63,4	89,0	72,5	90,8	71,3	91,2	73,1	90,7
Locais de Disposição	Lixão	14,1	26,7	11,5	18,1	12,5	17,2	12,4	17,4	11,4
	Aterro controlado	14,4	27,2	15,4	24,3	17,5	24,1	17,3	24,2	16,7
	Aterro Sanitário	24,4	46,1	36,5	57,6	42,6	58,7	41,7	58,4	45,0
Não coletado	6,4	10,0	3,3	4,7	1,7	2,2	1,2	1,5	1,5	1,9
Compostagem	0,6	1,0	0,4	0,6	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4
Reciclagem de papel	3,4	5,4	4,1	5,7	5,3	6,6	5,4	7,0	5,7	7,1

Notas: RSU - Resíduos Sólidos Urbanos; RSI – Resíduos Sólidos Industriais

**Tabela 27.** Dados referentes a Esgotos e Efluentes Industriais (Mt e %)

Nível de Atividade	2005		2010		2015		2016		2017	
	Mt DBO	%	Mt DBO	%	Mt DBO	%	Mt DBO	%	Mt DBO	%
Geração de Carga Orgânica	3	100	3,2	100	3,4	100	3,4	100	3,5	100
Carga Org. Coletada	0,5	16,7	0,9	27,5	1,4	39,9	1,4	40,5	1,4	41
Tipo de Tratamento	Processo Não Emissor	0,1	2,3	0,1	1,8	0	1,5	0	1,5	0
	Lodo Ativado	0,2	6,6	0,4	11,8	0,5	14,4	0,5	14,7	0,5
	Tratamento Anaeróbico	0,1	3,8	0,3	9,2	0,6	18,2	0,6	18,5	0,6
	Lagoa Facultativa	0,1	3,4	0,1	3,4	0,1	3,5	0,1	3,5	0,1
	Outros	0	0,5	0	1,3	0,1	2,4	0,1	2,4	0,1
Fossa séptica	0,3	10,5	0,3	10,8	0,4	12,2	0,4	12,5	0,4	12,9
Fossa rudimentar	0,5	16,4	0,4	13,7	0,4	11	0,4	10,5	0,3	10
Lançamento em corpos hídricos	1,7	56,4	1,5	48	1,2	36,8	1,2	36,5	1,2	36,2

As fontes dos dados acima e de outros a serem utilizados são as seguintes:

- População conforme IBGE;
- Disposição final de resíduos sólidos em aterros sanitários baseados na ABRELPE (2007 a 2016);
- Percentual de compostagem de resíduos sólidos baseado na PNSB (IBGE, 2000, 2008);
- Percentual de reciclagem de papel baseado em BRACELPA (2000, 2014);
- Queima de metano em aterros sanitários de acordo com o Inventário Nacional (MCTIC, 2010) e Estimativas Nacionais (MCTIC, 2015);
- Percentual de tratamento de águas residuais na PNSB (IBGE, 2000, 2008) e Atlas de Saneamento (ANA, 2017);
  - Porcentual de destruição de metano de estações de tratamento anaeróbicas (MCTIC, 2010, 2015);

#### 2.1.4 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE).

\_\_\_\_\_. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016. São Paulo, 2017 e 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA, 2017). Anuário.

BOB AMBIENTAL. Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. Central de Tratamento de Resíduos de Belford Roxo-RJ. Dez. 2012. Disponível em: <http://200.20.53.3:8081/cs/groups/public/documents/document/zew/mde2/~edisp/inea0016745.pdf>. Acesso em: 08 ago 2017.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Institui a Política Nacional de Saneamento Básico, 2007.

\_\_\_\_\_. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010a.

\_\_\_\_\_. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (BRACELPA, 2015). Anuário.

CETESB. Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos no Estado de São Paulo – IQR. Disponível em:<[http://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/mapa\\_ugrhis/mapa.php#](http://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/mapa_ugrhis/mapa.php#)> Acesso em: 11 out. 2017.

FARIA, Flávia dos Santos. 2002, Índice da Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002. 355 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE, 2010 and 2011). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. Rio de Janeiro, 2010. ISBN 978-85-240-4135-8. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 11 ago. 2014.

Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 02 out.2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme; Eggleston H.S.; Buendia L.; Miwa K.; Ngara T.; Tanabe K. (eds). Hayama, Japan: IGES, 2000. ISBN 4-88788-032-4.

LOUREIRO, Saulo Machado. Índice de Qualidade no Sistema da Gestão Ambiental em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos – IQS. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO e COMUNICAÇÃO (MCTIC). Comunicação Nacional Inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília, DF: MCTI, Relatórios técnicos de referência, 2004.

\_\_\_\_\_. II Inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo protocolo de Montreal. Ed. Alves, J. W. S.; Vieira, S. M. M. São Paulo: Cetesb, 2010.

\_\_\_\_\_. III Inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo protocolo de Montreal. Brasília, DF: MCTIC, Relatórios técnicos de referência, versão para consulta pública, 2015.

\_\_\_\_\_. Estimativas Nacionais de Emissão de Gases de Efeito Estufa, 2017.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília, DF, 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES. Brasília, DF, 2012.

MONTEIRO, Alessandra Elias. Índice de Qualidade em Aterros de Resíduos Sólidos Industriais – IQRI. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS (2018). Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – Brasília, DF: Ministério das Cidades

\_\_\_\_\_. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Brasília, DF: Ministério das Cidades

VON SPERLING, M.; OLIVEIRA, S. M. Avaliação comparativa de seis tecnologias de tratamento de esgoto em termos de atendimento a padrões de lançamento. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, 2005. Campo Grande. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2005.

### 3. Descrição da incorporação da proposta do Componente 1

Não se aplica

### 4. Descrição dos resultados a serem informados ao Componente 2B

Não se aplica

## B - MODELAGEM TOP-DOWN

### I – IMACLIM-BR

Esta seção descreve as bases de dados e metodologia utilizadas na calibração do modelo no ano-base de 2015 (subseção 1.1), em seguida são apresentadas as principais características do modelo (subseção 1.2) e as atualizações da última versão do modelo (subseção 1.3). A subseção 1.4 discute de que forma o arcabouço metodológico utilizado é capaz de atender às questões norteadoras do estudo. Por fim, o Anexo ilustra de forma esquemática as principais matrizes do IMACLIM-BR.

#### 1.1 Bases de dados – Calibração para 2015

O ponto de partida da calibração do ano-base, 2015, é a construção de uma matriz insumo-produto (MIP) híbrida, que é o core do modelo. O procedimento de hibridização é o conjunto de operações e manipulações necessárias para tornar consistentes os dados macroeconômicos das Contas Nacionais (CN) e do Balanço Energético Nacional (BEN).

Dentre os fluxos físicos, os fluxos energéticos têm a vantagem de poderem ser expressos em uma métrica comum, função de seu conteúdo de energia (ex: toneladas de petróleo equivalentes (TEP), BTU, Joules, etc.). Ademais, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) disponibiliza balanços energéticos anuais bastante detalhados, principalmente para os setores energéticos e industriais.

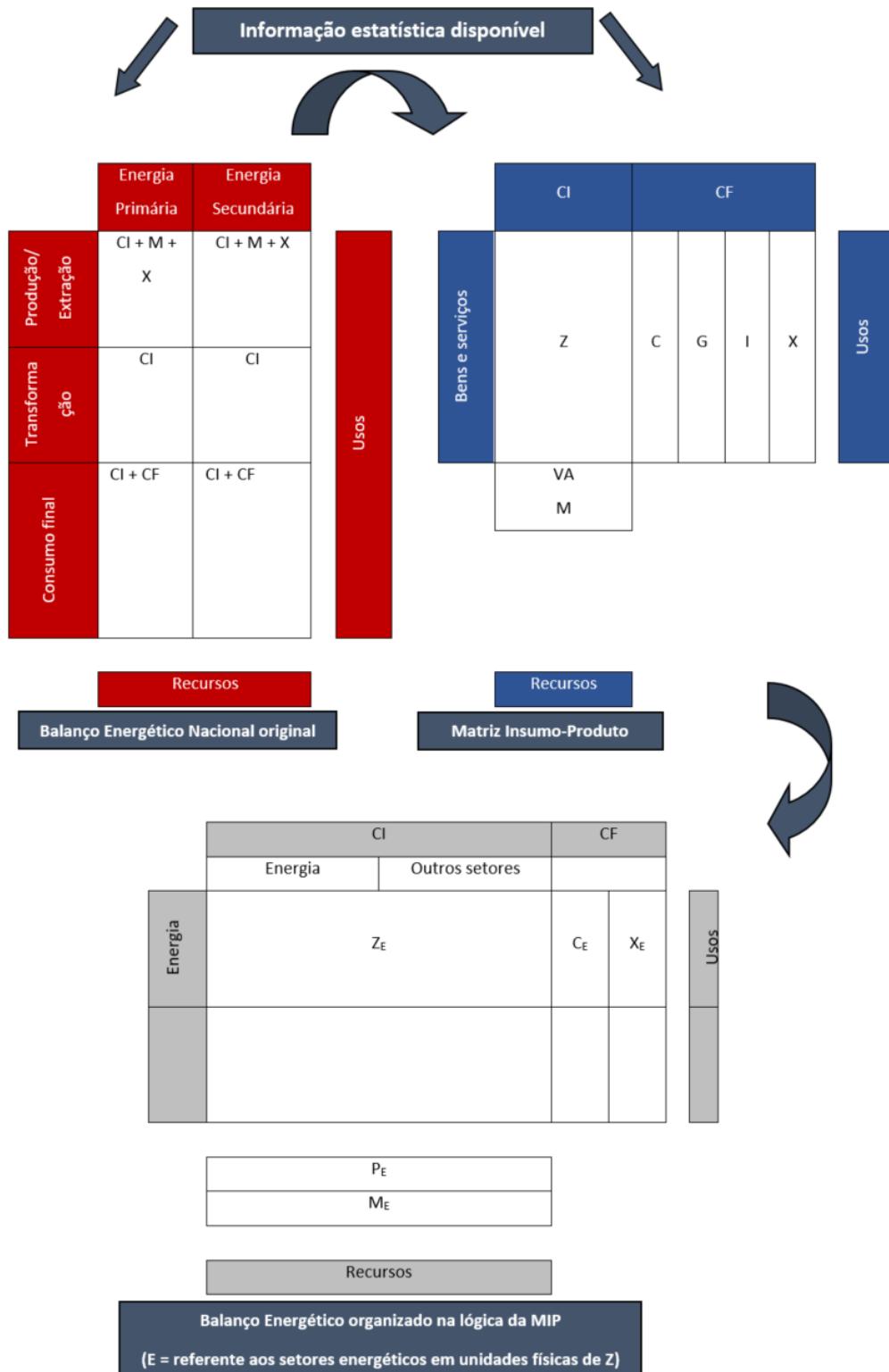
Além das CN e do BEN, a hibridização requer a consulta de fontes de dados, como a Pesquisa Industrial Anual (PIA) do IBGE, dados da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS), o Anuário Estatístico da ANP, dados estatísticos da ANAC e da EPL. Graças a uma melhor experiência no procedimento de hibridação desde a primeira calibração do IMACLIM-BR, a calibração em 2015 pôde ser conduzida com maior granularidade setorial.

Esse ganho de granularidade permite descrever os sistemas técnicos de forma mais detalhada e estabelecer uma melhor ligação com as especialidades setoriais dos modelos bottom up. Além disso, também representa uma oportunidade para testar medidas de compensação contrastadas entre os diversos setores para uma política de taxa de carbono.

A principal característica de uma MIP híbrida é o sistema de contabilidade dupla, que garante a consistência entre as matrizes monetária e física, ligadas por uma terceira matriz, a matriz de preços, que é variável e endógena ao modelo. Destaca-se que é necessário sempre

respeitar o princípio da conservação: qualquer utilização supõe a existência de um recurso, e qualquer recurso existente deve ser utilizado (mesmo que armazenado ou destruído). É um princípio de coerência análogo à lei de conservação das massas na física.

A partir dos dados disponíveis, a hibridização consiste na reorganização dos fluxos energéticos do BEN em uma lógica insumo-produto tal qual encontrado no SCN, que compreende as transformações e consumo de energia na sua produção, dentro do setor energético, o consumo intermediário de energia pelos setores produtivos (Z), o consumo final (C, X) e volumes de recursos produzidos (P) e importações (M). A figura a seguir ilustra tal procedimento.



**Figura 20.** Esquema metodológico do procedimento de hibridização

Fonte: (LEFÈVRE, 2012).

A partir da MIP híbrida, estende-se o arcabouço matricial de forma a representar outros fluxos monetários da economia que não dizem respeito aos setores produtivos, fornecidos pelas Contas Econômicas Integradas (CEI) do IBGE. Elabora-se, assim, uma matriz de contabilidade social (SAM), na qual a distribuição de renda primária e secundária na economia é representada de forma detalhada. São representados o sistema fiscal e as transferências do governo, o que é primordial para a simulação de diferentes formas de reciclagem das receitas oriundas de taxas de carbono.

A versão atual do IMACLIM-BR retrata a economia brasileira de forma aberta. A representação do modelo conta com:

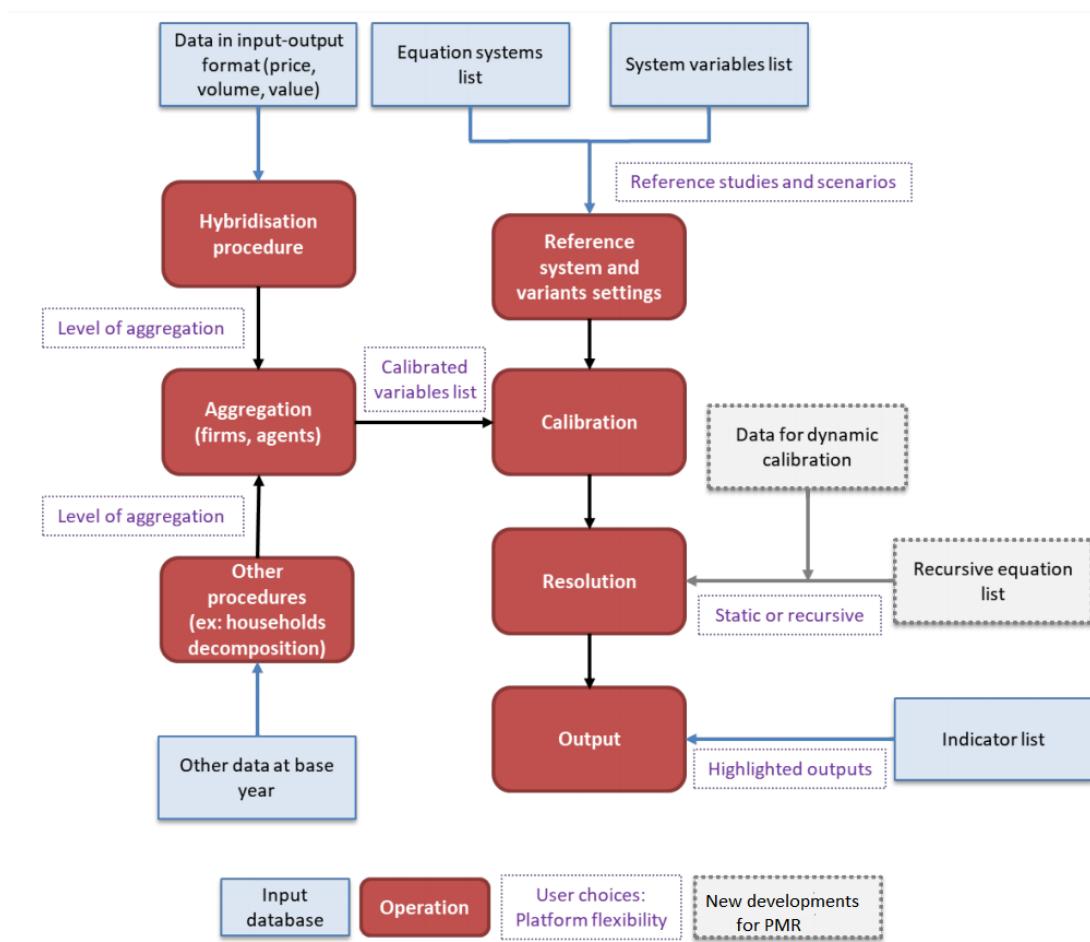
- 4 setores institucionais: Famílias, Empresas, Governo e Resto do Mundo. O setor institucional das famílias é dividido em 4 classes de renda (10% dos domicílios mais pobres e 3 blocos com os 30% seguintes).
- 2 fatores de produção primários: capital e trabalho;
- 19 setores produtivos: seis setores energéticos (carvão mineral, petróleo e refino (exceto diesel), gás natural, diesel, biocombustíveis e eletricidade), oito setores industriais (cimento, ferro e aço, alumínio e outros metais não-ferrosos, química, carne bovina, resto de alimentos e bebidas, papel e celulose, e outras indústrias), um setor AFOLU (floresta plantada), criação de gado, resto da agropecuária, setor de transporte e resto da economia (serviços).

## 1.2 Características gerais do IMACLIM-BR

Como os modelos CGE padrão, o IMACLIM-BR baseia-se na representação de mercados walrasianos de bens e serviços, com um balanço de renda global. A Matriz de Contabilidade Social é a base da estrutura contábil, na qual há representação dos fluxos econômicos e físicos de energia, equilibrados no médio e longo prazo, combinado com um mecanismo de crescimento implícito.

O sistema econômico no IMACLIM-BR é representado em sua forma “second best”. A representação do acúmulo de capital é realizada de maneira distinta daquela postulada pela economia competitiva, além de utilizar dados empíricos estruturais da economia para computar os futuros saldos contábeis e mercados walrasianos de bens e serviços, que são caracterizados pelo possível subemprego de fatores de produção (trabalho) e mercados imperfeitos (bens e fatores). A rigidez do mercado de trabalho é representada por uma curva de salários.

O comércio exterior é representado por elasticidades aos termos de troca, função dos custos de produção e preços domésticos e internacionais. A função de demanda final das famílias é definida por uma elasticidade-preço e uma elasticidade-renda, promovendo escolhas de consumo para os bens e serviços da economia, com atendimento mínimo das necessidades básicas. A figura a seguir apresenta a arquitetura do modelo de forma simplificada.



**Figura 21.** Arquitetura de modelagem

Fonte: Le Treut (2012)

O IMACLIM-BR se distingue dos modelos padrões de EGC pelo seu sistema de contabilidade casada. Além dos fluxos monetários, as quantidades físicas também são descritas (ex: toneladas equivalentes de petróleo, toneladas de produção industrial, etc.). A consistência é mantida via o sistema de preços. Dessa forma, é possível realizar sua integração com modelos setoriais (bottom-up) específicos para setores-chave, tais como transportes, indústria, oferta de

energia, entre outros, e representar detalhadamente inovações tecnológicas, alterações na demanda por energia e restrições na oferta de recursos, por exemplo.

Ao incorporar informações provenientes de tais análises ‘bottom-up’, é possível representar, de forma adequada, a flexibilidade tecnológica que permite aos setores da economia ajustarem-se a políticas climáticas no médio e longo prazo, descritas em curvas de possibilidade de inovação. Ao representar o progresso tecnológico de forma endógena à estrutura de modelagem integrada, o modelo é capaz de representar a indução de investimentos em tecnologias de baixo carbono, dispensando o uso de elasticidades constantes de substituição (CES).

A incorporação dessas informações ao modelo se dá por meio da troca de informações de produção e consumo de energia, fluxos de caixa, investimentos totais no período, substituição de combustíveis, eficiência energética, entre outros. Para cada setor tem-se uma lista de tecnologias que podem ser implementadas até o ano final, associando os custos de investimento e operação à troca ou economia de combustíveis, bem como informações referentes a outros insumos. Com estas informações chega-se a uma descrição detalhada da economia no ano final após a implementação das novas tecnologias selecionadas.

Cabe ressaltar que estas tecnologias não são inseridas no IMACLIM-BR em valores absolutos, mas por meio da atualização de coeficientes técnicos da matriz insumo-produto. Dessa forma, o modelo ajusta automaticamente o nível de investimento necessário e também as reduções/trocadas nos consumos de combustíveis e outros insumos, mantendo a consistência entre o nível de atividade de cada setor e o potencial de redução de consumo de energia e de emissões.

Uma flexibilidade notável do modelo é a possibilidade de alterar o sistema de resolução em torno de diferentes modelos econômicos que traduzem diferentes "visões" e comportamentos para a economia. As equações de comportamento dos agentes econômicos podem ser substituídas de acordo com dados empíricos disponíveis, enquanto as equações contábeis fazem parte do core do modelo e não podem ser substituídas, pois são sempre verificadas para assegurar a consistência macroeconômica.

Embora o modelo não permita diferenciar a simulação de diferentes instrumentos econômicos de precificação de emissões (taxa, mercado de carbono e sistemas híbridos), podem ser simulados diferentes cenários de reciclagem para as receitas provenientes da precificação, seja por diferentes alocações setoriais, seja por diferentes instrumentos de reciclagem, tais como programas de distribuição de renda, diminuição de encargos trabalhistas, etc.

Para mais detalhes do modelo<sup>16</sup> podem ser consultadas as teses de doutorado de Wills (2013), Lefevre (2016), Le Treut (2017) e Grotteria (2018). Os seguintes artigos em revistas científicas indexadas também podem ser consultados: Lefevre, Wills & Hourcade (2018), La Rovere et al (2018); La Rovere et al (2017).

### 1.3 Atualizações da versão atual do IMACLIM-BR para o projeto PMR

A versão mais recente (atual) do IMACLIM-BR conta com a atualização referente aos dados empregados e, principalmente, à adoção de características recursivas, que permitem melhor representação da trajetória técnico-econômica por trás da transição de longo prazo.

A utilização de um ano-base mais recente (2015) proporciona maior realismo às simulações, pois permite contemplar desenvolvimentos, ganhos de eficiência e alterações nos processos produtivos (traduzidas em novos coeficientes técnicos de produção) e na estrutura da economia comparativamente ao ano-base anterior 2005.

O crescimento econômico no IMACLIM-BR é baseado em fatores demográficos exógenos (crescimento populacional) e progresso técnico (fator que aumenta a produtividade do trabalho), mas com uma representação explícita da acumulação de capital, que cresce à mesma taxa que os fatores exógenos. Ou seja, o investimento bruto precisa repor a depreciação do capital e aumentar o estoque de capital, de forma que a razão entre capital e trabalho eficiente se mantenha em um nível adequado para a manutenção da atividade econômica.

O desenvolvimento da dinâmica explícita do estoque de capital e a flexibilização da proxy entre o estoque de capital (consumo total de capital fixo) e os fluxos reais de investimento (formação bruta de capital fixo) se dá por meio de simulações ano a ano para capturar a inércia explícita do capital. Esse recurso supõe um crescimento econômico suave entre o ano base e o tempo do horizonte para uma determinada projeção.

Ao incorporar a dinâmica de capital e equilíbrios intermediários, incluindo efeitos de retroalimentação a cada etapa de resolução, é possível representar diferentes regimes de crescimento da economia, aportes de investimento e níveis de taxa de carbono. Em outras palavras, o modelo é capaz de incorporar e processar informações referentes aos anos intermediários do período de simulação, o que não era oferecido nas versões anteriores, nas quais a simulação se reduzia a uma trajetória única entre os anos inicial e final (análise de estática-comparativa).

---

<sup>16</sup> O código do modelo pode ser encontrado online em: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3403961>

## II – IMACLIM-R (Mundo)

### A. Agregação e Dados

O IMACLIM-R é um modelo recursivo de crescimento multi-setor e multi-região. No modelo o mundo é dividido em 12 regiões, onde uma delas é o Brasil. O modelo foi inicialmente calibrado com dados da base de dados do GTAP 6 (2001), dados físicos de energia do ENERDATA 4.1 e dados de transporte de passageiros de Schafer e Victor (2000). A economia de cada região do mundo é dividida em 12 setores<sup>17</sup>.

### B. Equilíbrio Estático

O equilíbrio estático é de natureza Walrasiana: mercados domésticos e internacionais para todos os bens são descritos por um único conjunto de preços relativos. Do lado da produção, considerando que o fluxo total de investimentos está equilibrado, a taxa de utilização das capacidades de produção pode variar, e não há garantias de que toda a força de trabalho esteja empregada. Esses mecanismos dependem do comportamento dos agentes econômicos, no lado da demanda e da oferta.

O cálculo do equilíbrio determina as seguintes variáveis: preços relativos, salários, trabalho, quantidade de bens e serviços e fluxos de capital. No equilíbrio, todas essas variáveis satisfazem as condições de mercado, para todos os bens, sob restrições de orçamento dos agentes e países, além de respeitar o princípio de conservação de massa dos fluxos físicos.

### C. Ligações Dinâmicas: O Motor de Crescimento e as Mudanças Técnicas

No IMACLIM-R, a velocidade e a direção do crescimento econômico são governados por: (i) um motor de crescimento macroeconômico que determina a taxa de crescimento potencial em cada período de tempo. (ii) as mudanças técnicas relacionadas à energia em cada região que incluem a evolução da oferta de energia e a dinâmica dos equipamentos que a consomem. (iii) a mudança estrutural induzida resultante da evolução da composição da demanda residencial, de relações inter-setoriais e da produtividade de trabalho específicas de cada setor. Por último, o

---

<sup>17</sup> O modelo IMACLIM-R divide o mundo em 12 regiões econômicas (EUA, Canadá, Europa, OECD Pacífico, Antiga União Soviética, China, Índia, Brasil, Oriente Médio, África, Resto da Ásia e Resto da América Latina. A economia de cada região é dividida em 12 setores produtivos (carvão, óleo, gás natural, combustíveis líquidos, eletricidade, transporte aéreo, transporte aquaviário, transporte terrestre, construção civil, agricultura, indústria energointensivas, serviços e outras indústrias).

crescimento econômico real de uma região em um dado cenário resulta da interação entre esses três conjuntos de forças e dos mecanismos de inter-dependência que ligam uma dada região com o resto do mundo.

### **1. O Motor de Crescimento: Demografia, produtividade e investimentos**

O motor de crescimento do IMACLIM-R é constituído por: (i) tendências demográficas exógenas, (ii) crescimento da produtividade do trabalho, (iii) mecanismos de dependência de capital e (iv) hipóteses acerca das frações destinadas à poupança.

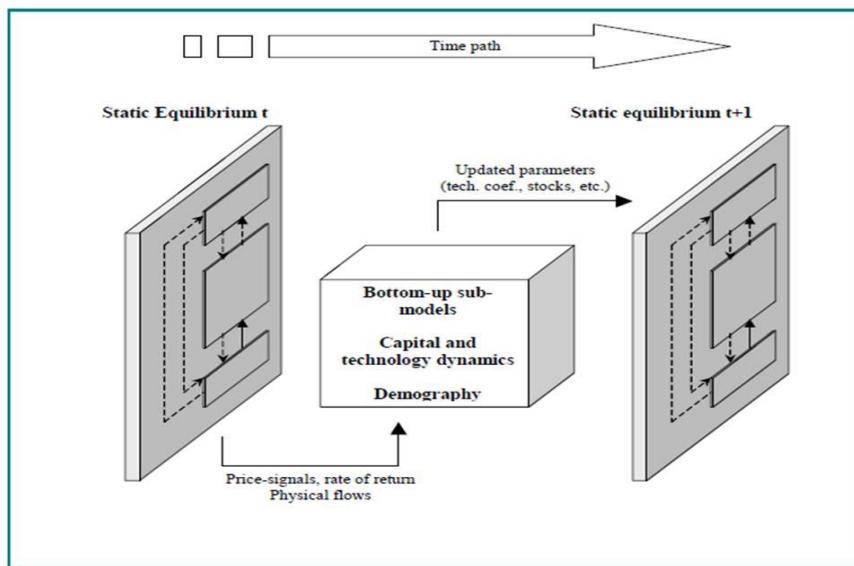
Suposições exógenas para tendências demográficas são derivadas de cenários das Nações Unidas corrigidos por fluxos de migração. O crescimento da produtividade do trabalho segue uma taxa de longo prazo constante para a maioria das economias avançadas, outras taxas são consideradas para outras regiões. Mais precisamente, a trajetória da linha de base é que a produtividade média dos EUA seguirá um crescimento fixo de 1,65% ao ano. Outras hipóteses são consideradas para os outros países, levando em conta as suas trajetórias históricas (Maddison, 1995) e o “best guess” das tendências de longo prazo (Oliveira-Martins et al., 2005).

### **2. Mudanças Técnicas relativas à Energia**

Como explicado previamente, todas as mudanças nos parâmetros técnicos são dirigidas pelo efeito cumulativo das escolhas econômicas no período projetado. Devido à incorporação das mudanças técnicas nos equipamentos, a mudança técnica endógena capturada pelo IMACLIM-R inclui influências da pesquisa e do desenvolvimento e do progresso técnico autônomo.

### **3. Mudança Estrutural**

O IMACLIM-R consegue captar mudanças estruturais resultantes de evoluções simultâneas da demanda final residencial, das tecnologias no setor de energia, de matrizes *input-output* e produtividade do trabalho. Um aspecto interessante do IMACLIM-R é a representação da mudança estrutural promovida pela dinâmica simulada nos modelos setoriais. A sua estrutura recursiva é organizada no entorno de uma troca sistemática de informações entre o equilíbrio anual estático e os módulos setoriais dinâmicos que informam sobre a evolução dos parâmetros tecnológicos entre dois equilíbrios. A figura a seguir apresenta a estrutura recursiva e modular do modelo IMACLIM-R.

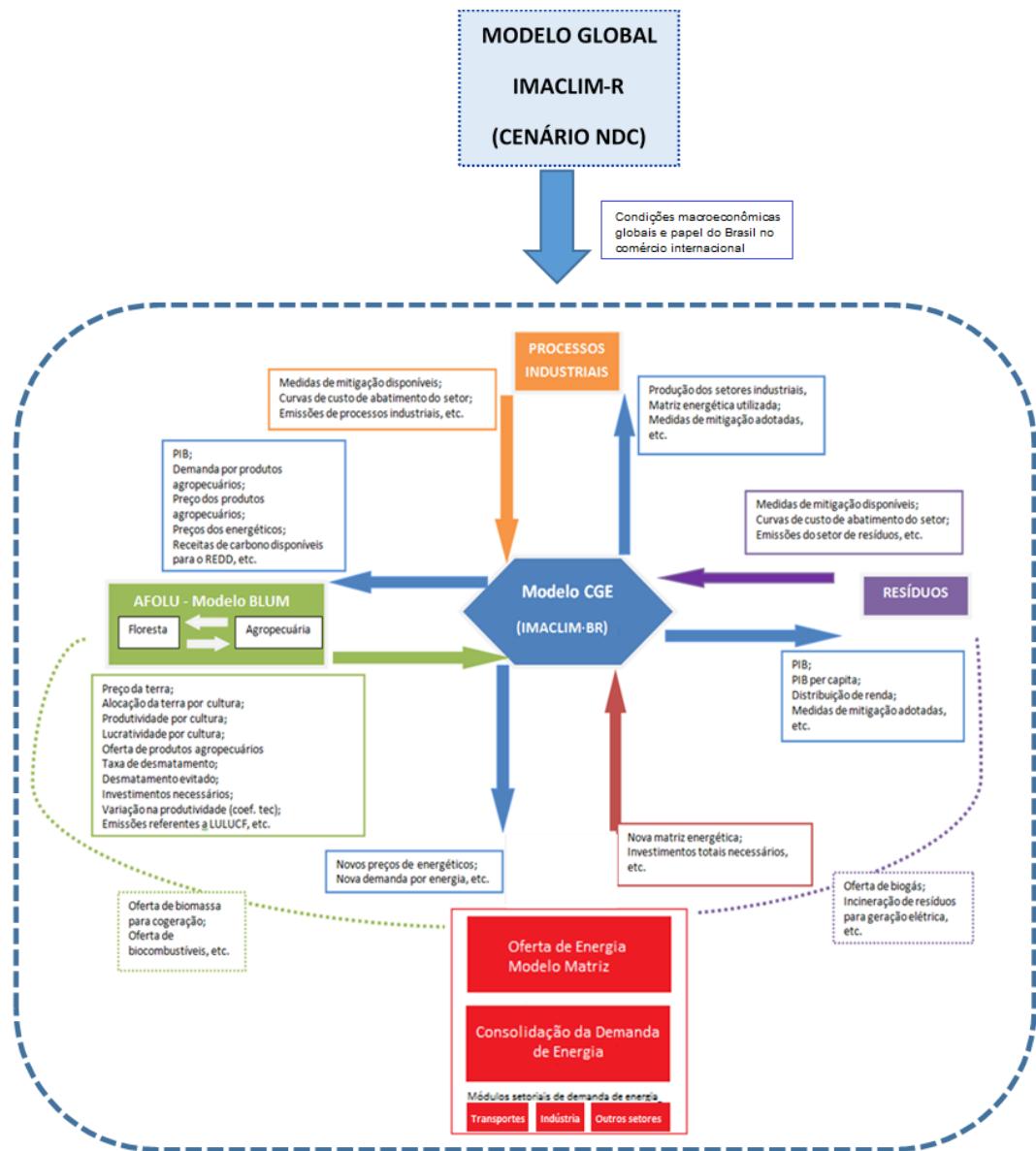


**Figura 22.**

Fonte: Waisman et al, 2012.

## C – ESTRUTURA DE MODELAGEM INTEGRADA

Nos capítulos anteriores foram apresentados em detalhes os diversos modelos Bottom-up (setoriais) e Top-Down (modelos de equilíbrio geral computável) que serão utilizados nas simulações dos cenários do projeto PMR. A integração destes diferentes modelos é um dos desafios metodológicos que o projeto PMR visa superar. Neste presente capítulo a estrutura de modelagem integrada será apresentada. A figura a seguir apresenta de forma simplificada a interação dos principais modelos que serão utilizados nas simulações.



O modelo de equilíbrio geral global, IMACLIM-R, será utilizado para prover as condições de contorno para a região “Brasil”, que é uma das 12 regiões desagregadas do modelo. O objetivo principal é fornecer de forma robusta um cenário global compatível com o alcance das NDCs conforme apresentadas no Acordo de Paris. Assim, este cenário não é um cenário Business as Usual, mas um cenário em que as diferentes regiões do globo estão buscando reduzir suas emissões de GEE através do investimento em medidas de mitigação.

Dada a importante premissa do projeto PMR de que o cenário de referência e todos os cenários de precificação propostos neste projeto alcançarão as metas da NDC, apenas um cenário global em que as diversas regiões também alcancem o cumprimento das metas da NDC será necessário. Desta forma, as condições globais de contorno para a região “Brasil” serão as mesmas em todos os cenários. Foi tomado o cuidado para que as principais premissas fossem alinhadas entre os modelos, como crescimento do PIB global, crescimento do PIB brasileiro, preço do barril de petróleo, balança comercial, entre outras. Devido à limitação de tempo e de recursos, foi considerado que uma potencial variação nos níveis de importação e exportação do Brasil nos cenários de precificação não alterariam de forma significativa o equilíbrio da economia do modelo de equilíbrio geral global, IMACLIM-R.

Espera-se que ao simular diversos cenários de atingimento das metas descritas na NDC, as importações e exportações do Brasil para o resto do mundo variem de acordo com a custo-efetividade do pacote de precificação proposto, e com a forma de proteção da competitividade dos setores produtivos brasileiros. Portanto, uma análise detalhada destas variáveis nos diferentes cenários é um dos pontos centrais deste projeto.

O modelo IMACLIM-R BR será conectado em um soft-link aos demais modelos setoriais, o modelo MATRIZ, de oferta de energia, o modelo BLUM, de uso do solo, e os modelos de transportes, indústria, resíduos e de demanda energética de outros setores (residencial, comercial, público e agropecuário).

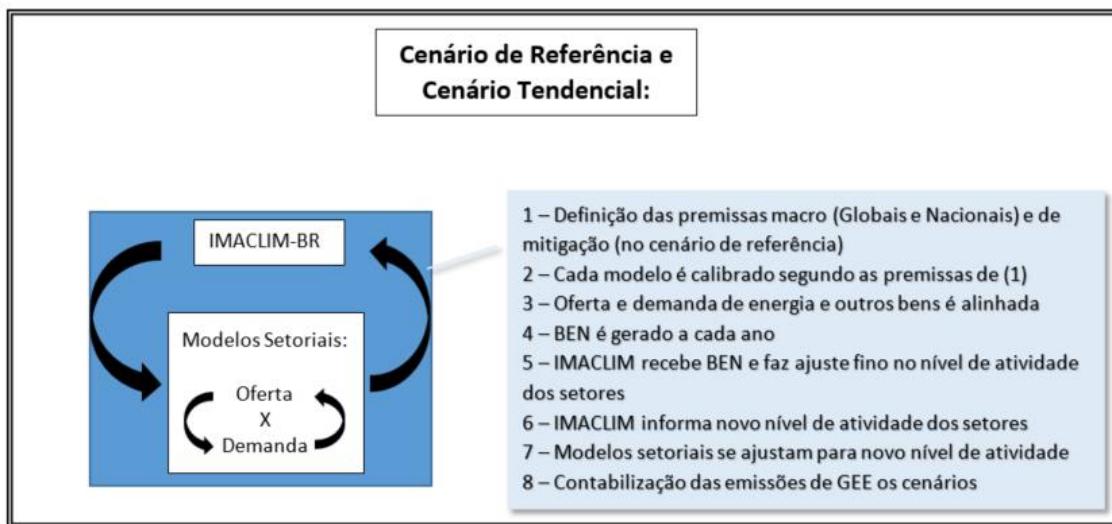
É importante ressaltar que o cenário tendencial é um cenário neutro, que não atinge as metas da NDC brasileira, e que será utilizado apenas como base para a inserção da política de precificação de carbono. O cenário de referência é que será a base de comparação para os cenários de precificação.

Em primeiro lugar são definidas as premissas macroeconômicas para que os modelos setoriais possam iniciar as simulações. No caso do cenário de referência, as premissas de medidas

de mitigação implementadas através da política de comando e controle também são inseridas nos modelos setoriais.

Com os modelos setoriais calibrados para estes cenários, as demandas de energia são consolidadas e informadas ao modelo de oferta de energia (MATRIZ), que busca atender à demanda consolidada da forma mais custo-efetiva, dadas as diversas restrições do sistema energético e do cenário em si. Após a rodada do MATRIZ, é gerado um balanço energético para cada ano da simulação (2015-2030).

No cenário de referência são computados todos os investimentos adicionais relacionados à política de comando e controle que visa reduzir as emissões de GEE do país. O modelo IMACLIM-BR recebe os balanços energéticos e as demandas por investimentos adicionais a cada ano, e busca alcançar o equilíbrio da economia após a implementação deste choque. Além de se utilizar do formato do BEN como base para troca das informações sobre produção, transformação e consumo de energia, e posterior calibração dos coeficientes técnicos dos setores produtivos, foram criados diversos templates em excel para troca de dados entre cada um dos modelos utilizados pelo Componente 2A. A figura a seguir apresenta de forma esquemática o passo a passo de uma rodada completa dos modelos nos cenários de Referência e Tendencial.

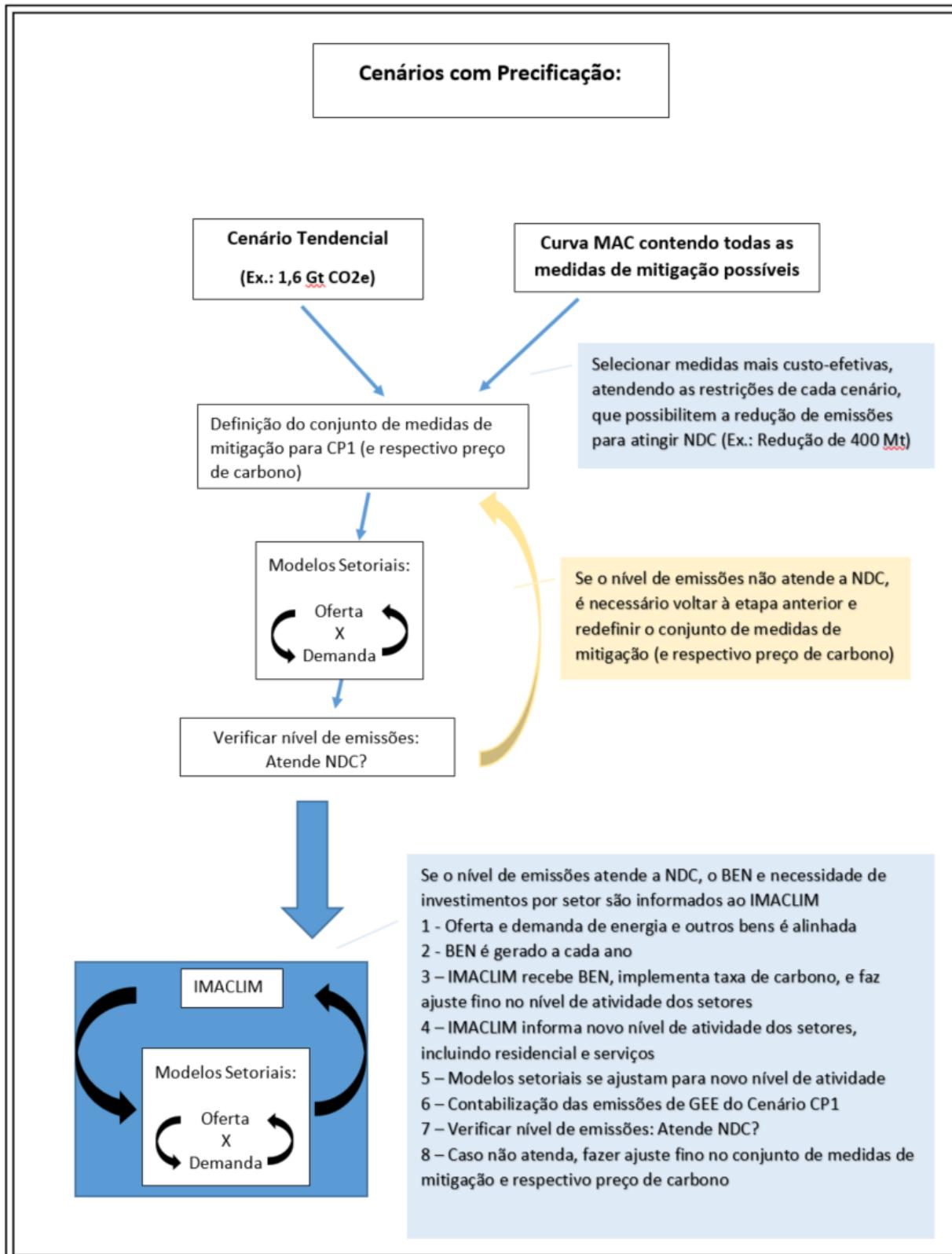


Com o novo equilíbrio da economia, o modelo IMACLIM-BR informa aos modelos setoriais os novos níveis de atividade decorrentes do choque simulado. Com esta informação, os modelos setoriais fazem um ajuste fino em seus níveis de atividade, garantindo um alinhamento entre os modelos BU e TD em termos de níveis de atividade e volumes de produção. Caso necessário, esse

passo é realizado novamente até que se garanta um alinhamento adequado entre os níveis de atividade dos modelos setoriais e dos setores produtivos descritos no IMACLIM-BR.

A última etapa consiste na contabilização das emissões de gases de efeito estufa, que é feita pelos modelos setoriais, após constatarem o alinhamento do nível de atividade com o modelo de equilíbrio geral.

A figura a seguir apresenta de forma esquemática o passo a passo de uma rodada completa dos modelos nos cenários de Precificação. Nestes cenários, as rodadas são mais complexas pois as medidas de mitigação são definidas endogenamente pelo conjunto de modelos, cuja conexão também se dá por um soft-link.



Os choques induzidos pelos cenários de precificação são sempre inseridos inicialmente sobre o mesmo cenário, o cenário tendencial, que busca simular a economia brasileira de forma neutra até 2030, projetando uma continuação das políticas e programas já existentes hoje, ou seja, é um cenário do tipo Business as Usual.

Esse cenário tendencial não atende as metas da NDC brasileira, nem em 2025 nem em 2030, e por isso é necessário se introduzir uma política climática. No caso do cenário de referência, foi introduzida uma política de comando e controle, e as medidas de mitigação que entraram neste cenário buscaram reproduzir, sempre que possível, aquelas descritas no anexo da NDC brasileira.

No caso dos cenários de precificação, será criada uma taxa que incidirá sobre as emissões de gases de efeito estufa, conforme indicado pelo Componente 1, cujos detalhes estão disponíveis no Produto 2 do Componente 2A. O objetivo de se inserir a política de precificação de carbono é de se buscar um cenário que possa ser mais custo-efetivo que o cenário de referência, o que segundo a teoria econômica, seria o resultado esperado. Assim, a política de precificação ajudaria os setores produtivos, e consequentemente o Brasil a adotar, de forma ordenada, as medidas de mitigação, partindo daquelas com menor custo por tonelada de CO<sub>2</sub>e para as com maior custo por tonelada de CO<sub>2</sub>e, até atingir a meta.

Nas simulações, portanto, os modelos setoriais verificam todas as potenciais medidas que poderiam ser implementadas nos seus respectivos setores, e informam ao IMACLIM-BR sobre todos os seus detalhes (incluindo o ano de implementação, custos de investimento por ano, redução de emissões por ano, redução/troca de consumo de energia por ano e etc), de forma a possibilitar a construção de uma curva de custo marginal de abatimento (curva MAC) para toda a economia brasileira.

Com estas informações são montadas duas curvas MAC, uma para o período 2021-2025 e outra para o período 2026-2030, e são escolhidas as medidas de mitigação que devem entrar em cada período de forma a propiciar ao país o alcance da meta da NDC, sempre partindo das opções mais baratas para as mais caras. Cada cenário de precificação tem suas nuances e particularidades, de forma que os conjuntos de medidas escolhidas em cada cenário são diferentes entre si, assim como o preço do carbono.

Com os conjuntos de medidas de mitigação definidos para cada cenário, os modelos setoriais informam suas demandas de energia e por outros bens e serviços, notadamente produtos agropecuários, de forma que o modelo MATRIZ (oferta de energia) e BLUM (uso do solo)

possam simular os respectivos cenários que atendam da melhor forma à demanda calculada pelos modelos de demanda, garantindo o alinhamento entre oferta e demanda nos modelos setoriais. Quando esta demanda está alinhada, é então verificado o nível de emissões de GEEs. Como informado anteriormente, as emissões de GEE são calculadas nos modelos setoriais, pois estes apresentam uma maior desagregação da economia e dos combustíveis, permitindo um cálculo de emissões de GEE mais preciso. A metodologia de cálculo de emissões utilizada é a mesma utilizada no Inventário Nacional.

Se as emissões calculadas pelos modelos setoriais atenderem as metas da NDC nos dois períodos, o modelo IMACLIM roda o cenário completo com as informações detalhadas relativas à implementação das medidas de mitigação selecionadas, incluindo o preço de carbono. Caso as emissões fiquem acima das metas da NDC, é necessário voltar ao passo anterior e incluir mais medidas de mitigação.

Após o novo equilíbrio, o IMACLIM-BR informa aos modelos setoriais sobre os novos níveis de atividade de cada setor. Os modelos setoriais fazem um ajuste fino nos seus níveis de atividade, garantindo o alinhamento em volumes entre os modelos BU e TD. Com o alinhamento em volumes garantido, os modelos setoriais calculam novamente as emissões de GEE. Caso as emissões fiquem acima das metas da NDC ou muito abaixo (% ainda a ser definido), é necessário voltar à passo em que é definido o conjunto de medidas de mitigação e fazer as correções necessárias.

Após garantir o alinhamento entre os modelos BU e TD, e garantir que as metas da NDC são observadas em ambos os períodos, pode-se considerar que o cenário de precificação em questão atingiu seu objetivo. Os dados detalhados das rodadas são então extraídos dos modelos e salvos para posterior análise e confecção do relatório final.

## D - CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESTRUTURA DE MODELAGEM UTILIZADA

O arcabouço de modelagem adotado é capaz de atender os aspectos identificados como essenciais para responder às questões norteadoras e aspectos de interesse do estudo, notadamente:

### **(i) Apresentação de resultados setoriais e agregados para PIB, empregos e balança comercial**

O modelo apresenta resultados detalhados para os 19 setores que compõem a matriz econômica, quais sejam: (Carvão, Diesel, Petróleo e outros derivados de petróleo, Gás natural, Biocombustíveis, Eletricidade, Floresta plantada, Pecuária, Resto da agricultura, Cimento, Ferro e aço, Alumínio e outros não ferrosos, Papel e celulose, Química, Carne bovina processada, Resto de alimentos e bebidas, Resto da indústria, Transportes, Resto de serviços e resto da economia)

São fornecidos resultados setoriais para as variáveis PIB, emprego, balança comercial, importações e exportações por setor, entre outros, além do agregado para toda a economia.

### **(ii) Análise do impacto sobre o resultado fiscal do setor público**

O impacto fiscal no setor público e a evolução da dívida pública podem ser apresentados anualmente. A representação do sistema tributário no IMACLIM-BR foi desenvolvida especificamente para o Brasil, com base nas Contas Nacionais publicadas pelo IBGE. Os impostos são agregados nas seguintes categorias: impostos sobre vendas, imposto de renda de famílias, impostos corporativos, impostos sobre folha de pagamento pagos pelas empresas, impostos sobre folha de pagamento pagos ao governo, imposto sobre produção e imposto de carbono.

### **(iii) Análise da distribuição de renda**

Todas as relações entre setores institucionais são contempladas no modelo Imaclim-BR, com base nas “Contas Econômicas Integradas”, que compõem o Sistema de Contas Nacionais publicadas pelo IBGE, com distribuição de renda primária e secundária.

O setor institucional das famílias é representado por 4 classes de renda, a partir do processamento de microdados de consumo e renda da Pesquisa de Orçamento Familiar (POF) também publicada pelo IBGE. A desagregação é constituída pelos seguintes estratos: 10% dos

domicílios mais pobres e 3 blocos com os 30% seguintes. A representação de diferentes classes de renda é essencial no Brasil, em vista dos altos níveis de pobreza e desigualdade.

**(iv) Apresentação de resultados setoriais e agregados das emissões de GEE**

O perfil de emissões é apresentado em detalhes para diferentes categorias: agricultura, florestas e uso do solo (AFOLU), transportes, indústria (inclui processos industriais), oferta de energia, resto da demanda de energia (residencial, serviços e setor público) e resíduos.

As emissões são calculadas a partir dos resultados da modelagem bottom-up, com base em uma robusta metodologia apresentada na Terceira Comunicação Nacional (MCTIC).

**(v) Análise dos impactos sobre a competitividade setorial**

Os resultados de competitividade são medidos pela variação nas exportações líquidas de cada setor, além da variação de preços setoriais.

O arcabouço de modelagem também permite testar diferentes mecanismos de proteção à competitividade. Nos cenários/pacotes simulados, haverá a isenção da precificação sobre as exportações.

Há também o cenário de ‘Ajuste de Fronteira’, no qual a precificação incide nos produtos cujos setores são regulados, aplicando o valor do tributo nacional e considerando uma intensidade de carbono média da produção nacional do produto em questão.

**(vi) Alto grau de detalhamento da matriz energética**

A matriz energética é apresentada para cada ano da simulação no mesmo formato do Balanço Energético Nacional (BEN) produzido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Ela é construída a partir dos resultados da modelagem bottom-up do setor de oferta de energia, que utiliza o modelo MATRIZ, e constitui um dos principais inputs para o modelo Imaclim-BR. Considera-se o perfil de emissões de cada setor e inovações tecnológicas disponíveis para a descarbonização.

**(vii) Representação da dinâmica de alterações no uso da terra**

A partir do modelo bottom-up BLUM, obtém-se alto grau de detalhamento acerca das atividades relacionadas à agropecuária e mudanças no uso da terra. Trata-se de um modelo de equilíbrio parcial nacional, multirregional, multi-mercado, dinâmico-recursivo para o setor agrícola brasileiro. O modelo inclui os seguintes produtos: soja, milho (primeira e segunda safra), algodão, arroz, feijão (primeira e segunda safra), cana-de-açúcar, trigo, cevada, laticínios, pecuária (carne bovina, frango, ovos e porco) e florestas plantadas. O território brasileiro é dividido em seis regiões geográficas, de acordo com padrões agrícolas e características da terra, como limites de biomas, legislação ambiental e dinâmica de uso da terra.

**(ix) Diferenciação entre instrumentos de precificação de carbono variados**

Os modelos macroeconômicos e setoriais utilizados são determinísticos, tratando o tributo como o dual de preços do mercado e, portanto, não são ideais para discernir o tipo de instrumento de precificação, mas sim os detalhes de desenho. Dessa forma, podemos variar o tipo de instrumento na modelagem sem afetar a inferência de causalidade em relação à variação realizada no desenho do instrumento.

Uma alternativa seria simular custos de transação para contemplar a diferenciação entre instrumentos. Entretanto, isto não foi considerado uma prioridade pela coordenação e decidiu-se que a variação no tipo de instrumento de precificação deverá ser avaliada pelo Componente 2B, com base nas análises fornecidas pelo Componente 1. Para o pacote base, por exemplo, foi sugerido um pacote híbrido, com mercado para indústria e tributo para outros setores.

**(x) Diferentes aspectos e nuances dos sistemas de comercialização de emissões e reciclagem da receita auferida**

Como explicado, há limitações metodológicas quanto à distinção entre sistemas de taxação de emissões, comercialização de permissões e opções híbridas. Isto se reflete na representação de diferentes formas de alocação das permissões no caso de um mercado de carbono. Por exemplo, não é possível simular a alocação de permissões por benchmark, por falta de dados que possam ser utilizados como referência. Mecanismos como esquemas de estabilização de preços não são simulados pois não há distinção entre mercado de carbono e taxa no modelo, como já discutido.

Já sistemas de grandfathering, leilões e isenções podem ser simulados aplicando os percentuais indicados pelo Componente 1, inclusive com diferenciação entre os períodos. A distribuição de licenças via grandfathering será maior no período 2021-2025 e reduzida no período 2026-2030.

O Componente 1 também é responsável por fornecer os dados referentes a offsets florestais, que poderão ser adquiridos pelos setores, limitados a 20% do abatimento requerido.

Para cada aplicação, é possível haver diferenciação de acordo com o setor (por exemplo, determinada pela exposição ao comércio internacional, dado também fornecido pelo Componente 1). Uma análise qualitativa dos aspectos que não podem ser inteiramente incorporados à modelagem deve ser realizada pelo Componente 2B.

Com relação às alternativas de reciclagem da receita auferida, o modelo permite que se escolha entre a distribuição direta às famílias (ou a uma parte específica das famílias, por exemplo, as classes de renda mais baixa), a desoneração dos impostos que incidem sobre a mão-de-obra, ou ainda esquemas híbridos com alocação parcial para cada uma destas opções.

**(xi) Possibilidade de integração entre modelos, abordando com mais detalhes os diversos tópicos relevantes e permitindo a incorporação de dados provenientes modelos desenvolvidos por especialistas de cada setor, como explorado na seção.**

O arcabouço de modelagem consiste na integração do modelo Imaclim-BR com modelos setoriais que simulam o setor de uso do solo e agropecuária, o setor energético, indústria, transportes, residencial e serviços. É feita também a integração com o modelo global Imaclim-R, que representa 12 regiões do mundo e fornece as condições de contorno para a simulação no âmbito nacional.

**(xii) Utilização de um modelo dinâmico**

A versão do modelo Imaclim-BR utilizada incorpora a dinâmica de capital e equilíbrios intermediários, incluindo efeitos de retroalimentação a cada etapa de resolução, isto é, em intervalos anuais entre 2015 e 2030. Desta forma, é possível representar diferentes regimes de crescimento da economia, aportes de investimento e níveis de taxa de carbono, a partir de uma análise dinâmico-recursiva.

**(xiii) Representação do progresso tecnológico endógeno, capaz de representar a indução de investimentos em tecnologias de baixo carbono.**

O Imaclim-BR pode representar progresso tecnológico endógeno ou exógeno, a partir de informações provenientes da análise dos especialistas dos modelos setoriais. Como explicado na seção **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o modelo Imaclim-BR é desenvolvido de forma a incorporar as informações fornecidas por modelos bottom-up, dispensando a necessidade de uso de elasticidades constantes de substituição (CES) ao longo do período simulado.

**(xiv) Consideração dos instrumentos de política setorial existentes, de modo a permitir uma análise da interação entre o instrumento proposto e outras políticas e regulamentos em vigor nos diferentes setores da economia. Desta forma, é possível incorporar quaisquer ajustes nessas políticas decorrentes a partir de indicações do Componente 1**

É possível considerar algumas políticas existentes dentro do arcabouço de modelagem, de forma a simular eventuais ajustes nos instrumentos setoriais. Notadamente, a CIDE<sup>18</sup> que atualmente incide sobre os combustíveis líquidos é substituída pela taxa de carbono, de modo a evitar a dupla regulação do setor. Com relação ao RenovaBio, estima-se o valor incidente sobre um determinado combustível (ou deverá variar anualmente), de forma a permitir que a taxa de carbono seja apenas um complemento do mesmo. A combinação do valor incidente referente ao RenovaBio e o valor complementar incidente referente à precificação equivale ao total da precificação de carbono a ser simulada.

Outros ajustes propostos a partir da análise do Componente 1 não podem ser explicitamente incorporados na modelagem e devem ser analisados pelo Componente 2B. Estes incluem: promover uma etiquetagem para emissões de GEE veicular e para equipamentos elétricos (adicionalmente à atual etiquetagem); remoção gradual dos subsídios do REPENEC e REPEX; phasing-out em 10 anos dos subsídios ao carvão mineral; adoção de tarifas binômias no mercado de energia elétrica; abertura e adoção de tarifas dinâmicas no mercado cativo de energia elétrica; adotar o formato “feebate” no programa ROTA2030; incluir critérios de elegibilidade por adoção de práticas de baixo carbono no crédito rural e melhorar condições do seguro rural para práticas de baixo carbono; alteração dos parâmetros no Imposto Territorial Rural.

---

<sup>18</sup> Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico

**(xv) Representar razoavelmente mudanças estruturais no horizonte temporal da análise**

As mudanças estruturais representadas são resultantes tanto de tendências demográficas e sociais quanto de tendências tecnológicas setoriais. Estas são incorporadas a partir das informações recebidas dos modelos bottom-up, tais como adições de capacidade instalada, investimentos, ganhos de eficiência, renovação do parque industrial, entre outros.

A seguir, discute-se se e como o arcabouço de modelagem é capaz de atender os aspectos identificados como desejáveis para responder às questões norteadoras do estudo, quais sejam:

**(i) Regionalização do modelo de forma a capturar os impactos e aspectos distributivos em cada região**

O modelo Imaclim-BR utiliza como base o Sistema de Contas Nacionais (SCN) do IBGE. Portanto, o modelo macroeconômico não captura de forma explícita as interações inter-regionais. Já o modelo de uso do solo (BLUM) é capaz de representar diferentes culturas para seis regiões. O modelo de energia MATRIZ também fornece resultados desagregados para as cinco regiões do Brasil (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul).

**(ii) Refinamento da calibração de elasticidades, uma limitação dos modelos CGE**

Este ponto é endereçado através da utilização de elasticidades-renda e elasticidade-preço que variam ao longo do período. Isto permite que se represente de forma mais realista a demanda dos agentes, levando em conta a saturação de determinadas categorias de consumo (ex: alimentos) ou o aumento da demanda por outras (ex: automóvel privado). Com relação à demanda de energia, especificamente, é possível informar os níveis de demanda diretamente ao modelo, por meio do balanço energético que é calculado pelo modelo Matriz.

**(iii) Diferenciação de resultados de instrumentos de precificação de carbono variados partindo das mesmas condições iniciais**

Como já mencionado, o modelo não faz distinção explícita entre taxa, mercado de carbono e sistemas híbridos.

**(iv) Representação de custos de transação, imperfeições de mercado e do sistema monetário**

Custo de transação (para taxas versos mercado, por exemplo) podem ser representados no Valor Adicionado (embora tenha-se julgado que esta não seria uma prioridade na modelagem do componente 2A).

Algumas imperfeições de mercado também são representadas no modelo Imaclim-BR, notadamente a rigidez do mercado de trabalho, representada por uma curva de salário que responde a variações no salário real. Isto permite uma representação mais realista do mercado de trabalho, levando em consideração o desemprego.

O sistema monetário/financeiro não é representado no modelo.

**(v) Representação de outras regiões do mundo, incluindo a possibilidade de simular instrumentos de precificação de carbono também nos parceiros comerciais, de forma a representar aspectos de competitividade**

O arcabouço de modelagem considera a interação da economia doméstica com um modelo global, o Imaclim-R, que representa 12 regiões do mundo (sendo o Brasil uma delas). Simulações no Imaclim-R são realizadas de forma a estabelecer as condições de contorno consideradas na modelagem nacional. É possível simular políticas de precificação em outros países, embora a interação entre sistemas de comércio de emissões no Brasil e no resto do mundo não sejam consideradas.

**(vi) Incorporação de análises de sensibilidade**

É possível realizar análises de sensibilidade, de forma a compreender como os resultados variam de acordo com a especificação dos parâmetros e outras escolhas metodológicas. Notadamente, seria interessante simular diferentes níveis de precificação de carbono (ex: 10 US\$/tCO<sub>2</sub>e e 50 US\$/tCO<sub>2</sub>e) e taxas de desconto (ex: 8% a.a. e 15% a.a.), que afetam os custos de abatimento das medidas de mitigação.

Entretanto, tais análises não estão previstas, dada a escassez de tempo e recursos e a grande quantidade de cenários a serem considerados na análise principal.

**(vii) Abordagem da questão da incerteza, um ponto fundamental na avaliação de cenários de longo prazo, pois as decisões dos agentes econômicos são significativamente afetadas pelo ambiente imprevisível no qual operam**

Este tópico pode ser contemplado a partir de análises de sensibilidades de parâmetros específicos, a serem selecionados juntamente às instituições contratantes. Entretanto, tais análises não estão previstas, dada a escassez de tempo e recursos e a enorme quantidade de cenários a serem considerados na análise principal.

## ANEXO I

A versão IMACLIM-BR utilizada neste trabalho, calibrada no ano de 2015, pode distinguir até 19 setores produtivos e dois fatores primários de produção: trabalho e capital. Todas as interações são sintetizadas em uma grande estrutura contábil composta por duas tabelas:

- Tabela A.1 – Matriz insumo-produto híbrida do modelo IMACLIM. Essa matriz é o *core* do modelo e sua estrutura apresenta, de forma equilibrada, os recursos e usos dos produtos.
- Tabela A.2 – Tabela das Contas Nacionais do modelo IMACLIM-BR, que detalha a distribuição primária e secundária de renda entre os agentes econômicos. O modelo distingue quatro agentes econômicos: Famílias (H), desagregadas em quatro classes de renda, Empresas (F), Governo (G) e o Resto do Mundo (ROW).

**Tabela A.1.** Matriz insumo-produto híbrida do modelo IMACLIM

		Consumo Intermediário (ICval <sub>ij</sub> )		Demanda Final (FCval <sub>i</sub> )				Usos (Use <sub>i</sub> )
		Setores híbridos	Setores não-híbridos	Famílias (C <sub>vali</sub> )	Governo (G <sub>vali</sub> )	Investimento (I <sub>vali</sub> )	Exportações (X <sub>vali</sub> )	
<b>Consumo Intermediário (ICval<sub>ij</sub>)</b>	Setores híbridos	$p_{ICij} * \alpha_{ij} * Y_j$	$p_{ICij} * \alpha_{ij} * Y_j$	$p_{Ci} * C_i$	$p_{Gi} * G_i$	$p_{li} * I_i$	$p_{xi} * X_i$	$\sum_j ICval_{ij} + FCval_i$
	Setores não-híbridos	$p_{ICij} * \alpha_{ij} * Y_j$	$p_{ICij} * \alpha_{ij} * Y_j$	$p_{Ci} * C_i$	$p_{Gi} * G_i$	$p_{li} * I_i$	$p_{xi} * X_i$	$\sum_j ICval_{ij} + FCval_i$
<b>Valor Adicionado (VA<sub>j</sub>)</b>	Renda do trabalho	$\omega_j * I_j * Y_j$	$\omega_j * I_j * Y_j$					
	Impostos sobre a mão-de-obra (T <sub>L</sub> )	$\tau_{TL} * \omega_j * I_j * Y_j$	$\tau_{TL} * \omega_j * I_j * Y_j$					
	Renda do capital	$p_{kj} * k_j * Y_j$	$p_{kj} * k_j * Y_j$					
	Impostos sobre a produção (T <sub>Y</sub> )	$\tau_{TYi} * p_{yi} * Y_j$	$\tau_{TYi} * p_{yi} * Y_j$					
	Margem de lucro	$\pi_j * p_{yi} * Y_j$	$\pi_j * p_{yi} * Y_j$					
<b>Produção (Y<sub>valj</sub>)</b>		$p_{Yj} * Y_j$	$p_{Yj} * Y_j$					
<b>Importação (M<sub>valj</sub>)</b>		$p_{Mj} * M_j$	$p_{Mj} * M_j$					
<b>Margens (Marg<sub>j</sub>)</b>	Margem de Comércio	$\tau_{CMi} * p_j * (Y_j + M_j)$	$\tau_{CMi} * p_j * (Y_j + M_j)$					
	Margem de Transporte	$\tau_{TMi} * p_j * (Y_j + M_j)$	$\tau_{TMi} * p_j * (Y_j + M_j)$					
	Margem específica no IC (SM <sub>ICj</sub> )	$\tau_{SMICij} * p_j * \alpha_{ij} * Y_j$	0					
	Margem específica no C (SM <sub>Cj</sub> )	$\tau_{SMCj} * p_j * C_j$	0					
	Margem específica no G (SM <sub>Gj</sub> )	$\tau_{SMGj} * p_j * G_j$	0					
	Margem específica no I (SM <sub>Ij</sub> )	$\tau_{SMIj} * p_j * I_j$	0					
	Margem específica no X (SM <sub>Xj</sub> )	$\tau_{SMXj} * p_j * X_j$	0					
<b>Impostos (T<sub>j</sub>)</b>	Impostos sobre o Valor Adicionado (T <sub>VATj</sub> )	$(\tau_{VATj} / 1 - \tau_{VATj}) * FCval_i$	$(\tau_{VATj} / 1 - \tau_{VATj}) * FCval_i$					
	Imposto sobre Energia no IC (T <sub>EnTICj</sub> )	$t_{EnTICj} * \sum_i (\alpha_{ij} * Y_j)$	$t_{EnTICj} * \sum_i (\alpha_{ij} * Y_j)$					
	Imposto sobre Energia no FC (T <sub>EnTFCj</sub> )	$t_{EnTFCj} * (C_j + G_j + I_j)$	$t_{EnTFCj} * (C_j + G_j + I_j)$					
	Outros impostos indiretos sobre produtos (T <sub>OPj</sub> )	$t_{OPTj} * \sum_i (\alpha_{ij} * Y_j + C_j + G_j + I_j)$	$t_{OPTj} * \sum_i (\alpha_{ij} * Y_j + C_j + G_j + I_j)$					
<b>Recursos (Sup<sub>j</sub>)</b>		$Y_{valj} + M_{valj} + Marg_j + T_j$	$Y_{valj} + M_{valj} + Marg_j + T_j$					

**Tabela A.2.** Tabela das Contas Nacionais do modelo IMACLIM-BR

	Empresas (F)	Governo (G)	Famílias (H)	Resto do Mundo (ROW)
Balança comercial	-	-	-	$\sum_i (p_{Mi} * M_i - p_{Xi} * X_i)$
Excedente Operacional Bruto (EOB)	$\omega_{KF} * GOS$	$\omega_{KG} * GOS$	$\omega_{KH} * GOS$	-
Renda do trabalho	-	-	$\sum_j (\omega_j * I_j * Y_j)$	-
Impostos sobre a mão-de-obra ( $T_L$ )	-	$\tau_{TL} * (\omega_j * I_j * Y_j)$	-	-
Impostos sobre a produção ( $T_Y$ )	-	$\sum_j \tau_{TYj} * p_{Yj} * Y_j$	-	-
Impostos sobre energia ( $T_{En}$ )	-	$\sum_j [t_{EnTCj} * \sum_i (\alpha_{ij} * Y_i) + t_{EnTFCj} * (C_j + G_j + I_j)]$	-	-
Outros impostos indiretos ( $T_{OP}$ )	-	$\sum_j [t_{OPTj} * \sum_i (\alpha_{ij} * Y_i + C_j + G_j + I_j)]$	-	-
Impostos sobre o Valor Adicionado ( $T_{VA}$ )	-	$\sum_j [(\tau_{VATj} / 1 - \tau_{VATj}) * FCval_i]$	-	-
Rendimento sobre propriedade	$-i_F * D_F$	$-i_G * D_G$	$-\sum_h (i_h * D_h)$	$i_F * D_F + i_G * D_G + \sum_h (i_h * D_h)$
Seguro desemprego (U)	-	$-\sum_h (\rho_{Uh} * N_{Uh})$	$\sum_h (\rho_{Uh} * N_{Uh})$	-
Pensões (P)	-	$-\sum_h (\rho_{Ph} * N_{Ph})$	$\sum_h (\rho_{Ph} * N_{Ph})$	-
Outras transferências sociais (O)	-	$-\sum_h (\rho_{Oh} * N_{Oh})$	$\sum_h (\rho_{Oh} * N_{Oh})$	-
Outras transferências (OT)	$\omega_{OTF} * OT$	$\omega_{OTG} * OT$	$\omega_{OTH} * OT$	$-OT * (\omega_{OTF} + \omega_{OTG} + \omega_{OTH})$
Impostos sobre renda ( $T_{IH}$ )	-	$\sum_h (\tau_{TIh} * RBT_h)$	$-\sum_h (\tau_{TIh} * RBT_h)$	-
Impostos sobre firmas ( $T_F$ )	$-\tau_{TF} * GOS_F$	$\tau_{TF} * GOS_F$	-	-
Outros impostos diretos ( $T_D$ )	-	$\sum_h (\tau_{TDh} * CPI)$	$-\sum_h (\tau_{TDh} * CPI)$	-
Renda Disponível Bruta (R)	$R_F = \sum_{row\ below}$	$R_G = \sum_{row\ below}$	$R_H = \sum_{row\ below}$	$R_{ROW} = \sum_{row\ below}$
Consumo final ( $FC_{val}$ )	-	$\sum_i Gval_i$	$R_{CONSH} = \sum_h (1 - \tau_{Sh}) * R_h$	-
Consumo bruto de capital fixo (GFCF)	$GFCF_F = (GFCF_{F0} / R_{F0}) * R_F$	$GFCF_G = (GFCF_{G0} / GDP_0) * GDP$	$GFCF_H = \sum_h (GFCF_{h0} / R_{h0}) * R_h$	-
Despesas para usos finais	$GFCF_F$	$\sum_i Gval_i + GFCF_G$	$R_{CONSH} + GFCF_H$	-
Capacidade de autofinanciamento (AFC)	$AFC_F = R_F - GFCF_F$	$AFC_G = R_G - [GFCF_G + \sum_i Gval_i]$	$AFC_H = \sum_h (\tau_{Sh} * R_h - GFCF_h)$	$AFC_{ROW} = -(AFC_F + AFC_G + AFC_H)$
Dívida financeira líquida (D)	$D_F = D_{F0} + t_{ref}/2 * (AFC_{F0} - AFC_F)$	$D_G = D_{G0} + t_{ref}/2 * (AFC_{G0} - AFC_G)$	$D_H = D_{H0} + t_{ref}/2 * (AFC_{H0} - AFC_H)$	$D_{ROW} = -(D_F + D_G + D_H)$