

## *Projeto IES – Brasil 2050*

### **RESUMO**

*Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de  
Emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE no Brasil  
até 2050*

*Cenário de Referência e Cenário 1,5°C*

Centro de Estudos Integrados sobre Meio  
Ambiente e Mudanças Climáticas  
**Centro Clima/COPPE/UFRJ**

**Apoio:**

**Instituto Clima e Sociedade (iCS) e WWF-Brasil**

## **CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ**

**COORDENAÇÃO GERAL:** Emilio Lèbre La Rovere

**COORDENAÇÃO TÉCNICA:** Carolina B.S. Dubeux e William Wills

**MODELAGEM MACROECONÔMICA:** William Wills

### **ESTUDOS SETORIAIS**

Setor de Transporte: Márcio de Almeida D'Agosto, Daniel Neves Schmitz Gonçalves e George Vasconcelos Goes (Laboratório de Transporte de Carga –LTC/COPPE/UFRJ)

Setor Industrial: Otto Hebeda

Setor Energético: Amaro Olímpio Pereira Junior e Gabriel Castro

Setor de Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU): Michele Karina Cotta Walter, Carolina B.S. Dubeux e Isabella da Fonseca Zicarelli

Setor de Resíduos: Saulo Machado Loureiro e Tairini Pimenta

Avaliação microeconômica: Carolina Grottera

Cobenefícios: Daniel Oberling

Integração dos Modelos Energéticos de Demanda: Claudio Gesteira

**APOIO:** Carmen Brandão Reis

**EDITORAÇÃO:** Elza Maria da Silveira Ramos

### **Citação:**

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.; 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, Cenário 1.5 ° C. COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.



## Sumário

Apresentação .....	1
1. Implicações Econômicas e Sociais de uma trajetória brasileira de emissões de GEE compatível com um Cenário 1,5°C.....	2
2. Setor de Transportes.....	11
2.1 Cenário de Referência .....	11
2.2 Cenário 1,5°C .....	11
2.3 Comparação dos Resultados .....	12
2.4 Cenário Disruptivo (a ser desenvolvido).....	13
3. Setor de Indústria.....	14
3.1 Cenário de Referência .....	14
3.2 Cenário 1,5°C .....	15
3.3 Comparação dos Resultados .....	16
3.4 Cenário Disruptivo (a ser desenvolvido).....	17
4. Oferta de Energia .....	18
4.1 Cenário de Referência .....	18
4.2 Cenário “1,5°C” .....	19
4.3 Comparação dos Resultados .....	19
4.4 Cenário Disruptivo (a ser desenvolvido).....	20
5. AFOLU.....	21
5.1 Cenário de Referência .....	21
5.2 Cenário 1,5°C .....	22
5.3 Comparação dos Resultados .....	23
5.4 Cenário Disruptivo (a ser desenvolvido).....	24
6. Setor Resíduos.....	25
6.1 Cenário de Referência .....	25
6.2 Cenário 1,5°C .....	27
6.3 Comparação dos Resultados .....	29
6.4 Cenário Disruptivo (a ser desenvolvido).....	30
7. Consolidação das Emissões .....	31
8. Avaliação Microeconômica .....	33
8.1 Metodologia de Cálculo dos Custos Marginais de Abatimento .....	33
8.2 Custos de Abatimento das Opções de Mitigação do Cenário 1,5°C.....	35
8.3 Análise de Sensibilidade dos Custos de Abatimento de Emissões .....	38
9. Estimativa de Co-benefícios da Mitigação de Emissões de GEE no Setor Transporte.....	39
10. Referências .....	42
Anexo.....	44

## Apresentação

O Projeto IES-Brasil 2030, coordenado pelo Centro Clima da COPPE/UFRJ, no âmbito do Forum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC, com apoio do governo brasileiro através do Ministério do Meio Ambiente – MMA, e do projeto internacional Mitigation Actions, Plans and Scenarios - MAPS, usou um processo participativo para elaborar cenários de mitigação das emissões de GEE do Brasil até 2030 e avaliar suas Implicações Econômicas e Sociais. Este projeto, realizado de 2013 a 2015, constituiu-se numa experiência bem-sucedida de estabelecer um diálogo transparente e construtivo entre cerca de 70 membros de instituições de governo, setor produtivo, ONGs e comunidade científica atuantes na área de mudanças climáticas, reunidos na Comissão de Elaboração de Cenários – CEC. Na quantificação dos cenários, além de modelos técnico-econômicos setoriais para AFOLU, Energia, Transportes e outros setores, foi utilizado um modelo macroeconômico de equilíbrio geral, o IMACLIM-BR, especialmente desenvolvido pela equipe do Centro Clima para simular as implicações econômicas e sociais da redução de emissões de GEE do país. A CEC discutiu e validou as hipóteses mais pertinentes para serem testadas nos cenários elaborados, analisando as barreiras para adoção das medidas de mitigação propostas e instrumentos de política pública para superá-los.

O produto final do IES-Brasil 2030, um relatório com a síntese da análise comparativa dos três cenários elaborados, mostrou a viabilidade de uma redução significativa das emissões do Brasil até 2030 sem comprometer o crescimento econômico e a qualidade de vida da população. Seus resultados foram apresentados ao MMA e outros ministérios, e à plenária do FBMC, fornecendo elementos valiosos para a preparação da NDC brasileira (a Contribuição Nacionalmente Determinada) apresentada à Convenção do Clima – UNFCCC e ratificada pelo Congresso Nacional.

Ao longo do ano de 2016, o Centro Clima desenvolveu com apoio do Instituto Clima e Sociedade – ICS, um estudo técnico visando preparar a realização de um projeto IES- Brasil 2050, nos mesmos moldes, estendendo o horizonte de análise até 2050. O WWF – Brasil também apoiou este trabalho, através da organização em junho de 2016 de um Workshop para discussão da CEC sobre um cenário básico, incluindo a realização da NDC até 2030, de referência para as emissões de GEE do país até 2050.

Em 2017, o ICS e o WWF - Brasil solicitaram ao Centro Clima o prosseguimento desse estudo, buscando a elaboração de cenários de mitigação adicional das emissões de GEE, em trajetórias compatíveis com a estabilização da temperatura global limitada a um aumento de 1,5°C acima do nível pré-Revolução Industrial.

Assim, o objetivo do presente estudo do Projeto IES-Brasil 2050 é a definição de medidas de mitigação adicionais às já em andamento no país para um cenário compatível com a estabilização da temperatura global limitada a um aumento de 1,5°C acima do nível pré-Revolução Industrial, e avaliar suas Implicações Econômicas e Sociais até 2050.

Em 2017, foram realizadas duas reuniões da Comissão de Elaboração de Cenários – CEC. Na 1ª reunião, em junho, com cerca de 70 membros de instituições de governo, setor produtivo, ONGs e comunidade científica atuantes na área de mudanças climáticas, foram discutidas e validadas as hipóteses de um Cenário 1,5°C para o Brasil, baseado em tecnologias já disponíveis. Na 2ª reunião, em outubro, foram avaliados os resultados obtidos a partir da modelagem quantitativa desse cenário realizada pela equipe do Centro Clima.

A CEC também sugeriu a elaboração de outro Cenário 1,5°C para o Brasil, baseado na hipótese de ocorrência de mudanças disruptivas, tecnológicas e comportamentais. A partir da discussão de tendências e tecnologias incipientes, foi elaborada uma lista preliminar de mudanças a serem consideradas na elaboração de um “Cenário de Mudanças Disruptivas” a ser detalhado numa próxima etapa do estudo.

O resultado deste estudo vem fornecer insumos para a elaboração de uma estratégia brasileira de desenvolvimento de baixa emissão de GEE no longo prazo (2050), contribuindo para a sua definição, prevista para 2020 no âmbito da Convenção do Clima (UNFCCC).

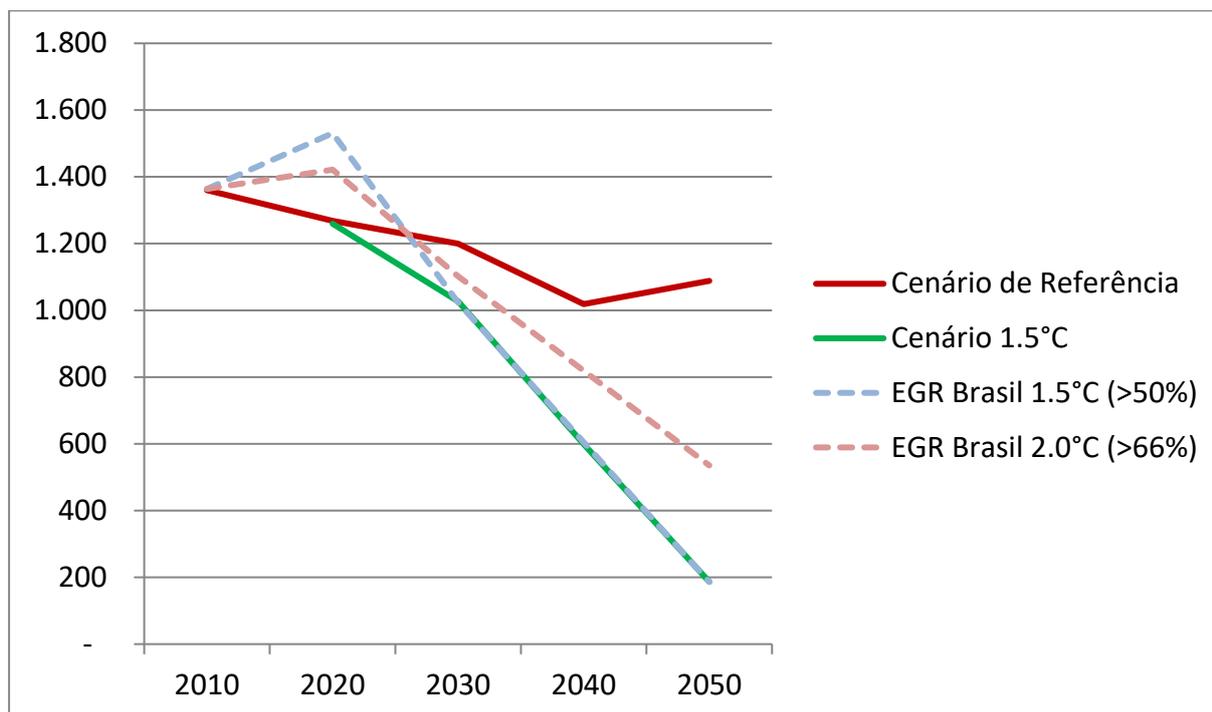
## **1. Implicações Econômicas e Sociais de uma trajetória brasileira de emissões de GEE compatível com um Cenário 1,5°C**

A NDC brasileira é uma das mais ambiciosas dentre os países em desenvolvimento, visando uma redução de GEE de 37% em 2025 e de 43% em 2030 no nível absoluto de emissões em relação a 2005. O desenvolvimento de novos cenários de descarbonização no Brasil até meados do século é fundamental para conceber estratégias revisadas e mais ambiciosas que mantenham a trajetória das emissões de GEE do país em linha com o objetivo do acordo de Paris, mantendo o aquecimento global bem abaixo de 2°C, idealmente abaixo de 1,5°C. Este estudo realizou uma análise comparativa de dois cenários brasileiros de 2050: um Cenário de Referência (Cenário REF) com a plena implementação da NDC até 2030, mas sem aumento de ambição após esta data, e uma estratégia de desenvolvimento de baixa emissão, compatível com um cenário de emissões mundiais que limite o aquecimento global a no máximo 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais (Cenário 1,5°C).

Atualmente, o Brasil enfrenta uma das recessões mais graves da história. O PIB caiu 7,5% nos últimos três anos. Em 2017, o PIB brasileiro deverá aumentar apenas cerca de 0,5%, perto da estagnação e, no final de fevereiro de 2017, a taxa de desemprego tinha atingido 12,6%, o que representa cerca de 12,9 milhões de trabalhadores sem trabalho. É necessário um grande rearranjo da economia para retomar o crescimento econômico sustentado, o que só é projetado a partir de 2020. Com esta nova tendência em mente, reduzimos as projeções pré-crise de alto crescimento econômico feitas pelo governo e usadas para projetar a NDC brasileira. No Cenário de Referência (REF), a nova taxa de crescimento anual média assumida para o período 2015-2050 é agora de 2,8% ao ano, apenas ligeiramente superior à média dos últimos 35 anos.

O Cenário REF assume a continuidade da execução da política nacional de mitigação das mudanças climáticas, com medidas capazes de alcançar os objetivos voluntários de redução das emissões de GEE em 2020, assumidos na COP15 em Copenhague, e os compromissos assumidos para 2025 e 2030 na NDC brasileira, apresentada antes da COP21, em 2015. Assim, não se trata de uma trajetória do tipo “business as usual”, mas de um cenário com uma política governamental de mitigação capaz de superar as dificuldades e atingir a meta de emissões de GEE para a economia brasileira como um todo até 2030. No período 2030-2059, assume-se neste cenário a continuidade das medidas governamentais implantadas, mas sem sua intensificação, ou seja, sem que sucessivas NDCs elevem o nível de ambição do país em seus esforços de mitigação.

De acordo com o Emissions Gap Report (EGR) publicado pelo PNUMA (UNEP, 2016), para se ter 50% de probabilidade de atingir a meta de limitar o aquecimento global a 1,5°C, as emissões globais de GEE deverão ser inferiores a 8 GtCO<sub>2</sub>e em 2050, em um mundo com quase 10 bilhões de habitantes limitando suas emissões médias de GEE a 0,82 toneladas de CO<sub>2</sub>e per capita. Segundo o IBGE, a população brasileira atingirá 226 milhões de habitantes em 2050, e se usarmos o critério de uma emissão per capita igual para todos, em um hipotético cenário brasileiro de 1,5°C as emissões de GEE brasileiras deveriam ser limitadas a 186 MtCO<sub>2</sub>e em 2050 e suas emissões acumuladas de GEE 2010-2050 consistentes com a trajetória de emissão de GEE de 1,5 °C, inferida a partir do EGR. Na Figura 1 as trajetórias compatíveis com os objetivos de 1,5 °C e de 2 °C, estimadas a partir do EGR são apresentadas (linhas pontilhadas), juntamente com o Cenário de Referência e com o Cenário 1,5 °C desenvolvidos para o Brasil (linhas sólidas).



**Figura 1.** Trajetórias de emissões segundo o EGR e no exercício IES Brasil 2050 (Mt CO<sub>2</sub>e)

O Cenário 1,5°C mantém o mesmo pressuposto inicial de crescimento do PIB que no REF, e para conseguir uma descarbonização suficientemente profunda, consideramos extensas medidas adicionais de mitigação (proteção das florestas, agricultura e pecuária de baixo carbono, produção e uso de biomassa de alta eficiência, geração de eletricidade de fontes renováveis, veículos elétricos, e mudanças modais para ferrovias e vias navegáveis no setor de transporte), juntamente com a introdução a partir de 2021 de uma taxa de carbono de 100 US\$/ t CO<sub>2</sub>e, incidente sobre a queima de combustíveis fósseis.

A Tabela 1, a seguir, apresenta os resultados dos dois cenários, comparando o crescimento do PIB, PIB per capita, investimentos, balança comercial, postos de trabalho, entre outros indicadores macroeconômicos.

**Tabela 1.** Principais indicadores macroeconômicos

	Cenário	2005	2015	2030	2050
<b>População (Milhões)</b>		185	204	223	226
<b>PIB (Trilhões de R\$2015)</b>	REF	4,52	5,60	8,99	14,71
	1,5°C			8,88 (-1,2%)	14,56 (-1,0%)
<b>Crescimento anual do PIB desde 2005 (% a.a.)</b>	REF	-	2,14	2,79	2,66
	1,5°C			2,74	2,64
<b>Taxa de Investimento (% do PIB)</b>	REF	15,5%	16,4%	17,6%	18,6%
	1,5°C			18,7%	20,4%
<b>Investimentos Totais (Trilhões de R\$2015)</b>	REF	0,70	0,92	1,58	2,74
	1,5°C			1,66	2,97
<b>Postos de Trabalho (milhões)</b>	REF	91,2	99,8	115,7	111,3
	1,5°C			115,3	110,7
<b>Taxa de Desemprego (%)</b>	REF	9,9%	8,5%	9,1%	7,5%
	1,5°C			9,5%	7,9%
<b>PIB per Capita (mil R\$2015)</b>	REF	24,4	27,4	40,3	65,1
	1,5°C			39,8	64,4
<b>Saldo da Balança Comercial (Bilhões de R\$2015)</b>	REF	166	242	435	811
	1,5°C			110	379
<b>Saldo da Balança Comercial (% PIB)</b>	REF	3,7%	4,3%	4,8%	5,5%
	1,5°C			1,2%	2,6%
<b>Exposição ao Comércio Exterior (X+M)/PIB</b>	REF	0,272	0,285	0,292	0,338
	1,5°C			0,244	0,303
<b>Índice de preços acumulado desde 2015</b>	REF			8,8%	15,1%
	1,5°C			46,9%	42,0%
<b>Taxa de Carbono sobre as emissões da produção e uso de energia (US\$/tCO<sub>2</sub>e)</b>	REF	-	-	-	-
	1,5°C			100	100
<b>Investimentos Totais em Mitigação Adicional nos Períodos 2021- 2030 e 2031 - 2050 (Bilhões de R\$2015)</b>	REF	-	-	-	-
	1,5°C			112,6	2016,4
<b>Emissões Totais (Mt CO<sub>2</sub>e)</b>	REF	2838	1701	1200	1088
	1,5°C			1027	187
<b>Emissões per capita (tCO<sub>2</sub>e/capita)</b>	REF	15,3	8,3	5,4	4,8
	1,5°C			4,6	0,8
<b>Emissões por PIB (tCO<sub>2</sub>e/milhões de US\$ de 2015)</b>	REF	460	304	133	74
	1,5°C			116	13

Nos dois cenários, em 2030, o PIB per capita brasileiro chegaria ao nível atual de países de maior renda média da América Latina e Europa Oriental, Argentina, Hungria e Polônia e, até 2050, alcançaria os níveis atuais de Portugal e da República Tcheca.

O PIB total foi ligeiramente reduzido em 2030 (-1.2%, de R\$ 8,99 para R\$ 8,88 trilhões de reais de 2015), e em 2050 (-1,0%, de 14,71 para 14,56 trilhões de reais de 2015) no Cenário 1,5°C em comparação com o Cenário de Referência. Mas a queda na taxa média anual de crescimento do PIB seria apenas de 2,79 para 2,74% a.a. em 2021-2030 e de 2,66 para 2,64% a.a. em 2031-2050.

Os investimentos totais aumentam no Cenário 1,5°C em relação ao Cenário REF, exigindo que a taxa de investimento como proporção do PIB cresça de 17,6 para 18,7% em 2021-2030 e de 18,6 para 20,4% em 2031-2050. Os investimentos adicionais em mitigação acumulados no período seriam de 113 bilhões de reais de 2015 em 2021-2030 e de mais de 2 trilhões de reais de 2015 em 2031-2050.

Devido à elevada taxa de carbono, o aumento do índice geral de preços em relação a 2015 é bem maior no Cenário 1,5°C, de 46,9% em 2030 e de 42% em 2050, do que no Cenário REF, de 8,8% em 2030 e 15,1% em 2050. Em paralelo, o saldo da balança comercial seria reduzido, passando no Cenário 1,5°C para 1,2% em 2030 e 2,6% em 2050, contra 4,8% em 2030 e 5,5% em 2050 no Cenário REF.

No cenário de Referência, apesar do crescimento significativo do PIB e do PIB per capita, em 2030 as emissões totais seriam 42% das de 2005 e as emissões per capita pouco mais que um terço das de 2005, ilustrando que o Cenário de Referência não é um cenário do tipo “business as usual”, e que as metas da NDC brasileira até 2030 são ambiciosas. No entanto, se políticas de mitigação adicional não forem implementadas, a partir de 2030 as emissões totais de gases de efeito estufa cairiam muito pouco, chegando a 1,09 bilhões de t de CO<sub>2</sub>e em 2050. No Cenário 1,5°C, são necessárias medidas adicionais de mitigação para reduzir as emissões de GEE brasileiras, atingindo em 2050 um nível 83% menor do que no REF (0,187 contra 1,088 GtCO<sub>2</sub>e). Este cenário pode ser considerado compatível com um aumento de temperatura global de 1,5°C, pois as emissões são menores do que na trajetória EGR Brasil de 1,5°C apresentada na Figura 1.

A política de utilização de receitas da taxa de carbono para diminuir os encargos sociais e trabalhistas, sem aumento da carga total de impostos, permitiria promover a criação de novos empregos, ajudando a manter o mercado de trabalho aquecido. Assim, a taxa de desemprego aumentaria muito pouco no Cenário 1,5°C em relação ao Cenário REF, atingindo 9,5% contra 9,1% em 2030 e 7,9% contra 7,5% em 2050. Ou seja, no Cenário 1,5°C a taxa de desemprego em 2030 seria inferior à registrada em 2005 e a de 2050, inferior à de 2015.

A Tabela 2, a seguir, apresenta a evolução da renda real, por classe de renda, para ambos os cenários.

**Tabela 2.** Renda anual média per capita, por classe de renda (mil R\$ de 2015)

Renda Anual Média per capita	Cenário	2005	2015	2030	2030 (%)	2050	2050 (%)
<b>Classe 1</b> <b>(10% mais pobres)</b>	REF	2,0	2,4	3,8		12,8	
	1,5°C			3,8	-2,1%	12,7	-0,8%
<b>Classe 2</b> <b>(20% seguintes)</b>	REF	5,0	5,8	8,7		15,0	
	1,5°C			8,6	-2,0%	14,9	-0,8%
<b>Classe 3</b> <b>(20% seguintes)</b>	REF	8,3	10,1	14,0		24,4	
	1,5°C			13,7	-2,0%	24,2	-0,8%
<b>Classe 4</b> <b>(20% seguintes)</b>	REF	11,6	15,5	23,2		40,2	
	1,5°C			22,7	-2,0%	39,9	-0,8%
<b>Classe 5</b> <b>(20% seguintes)</b>	REF	26,0	32,2	44,4		67,3	
	1,5°C			43,6	-1,9%	66,8	-0,8%
<b>Classe 6</b> <b>(10% mais ricos)</b>	REF	106,5	122,5	165,9		264,8	
	1,5°C			163,4	-1,5%	262,8	-0,7%

O rendimento das famílias diminuiu apenas marginalmente no Cenário 1,5°C, se comparado ao REF. Entretanto, o crescimento absoluto da renda entre 2015 e 2050 foi muito significativo e a segurança energética e alimentar do ponto de vista dos consumidores das classes mais pobres foi preservada. As transferências de renda do Governo também ajudariam a garantir um impacto mínimo sobre a renda da Classe 1, a mais pobre. Os ganhos de desenvolvimento social também seriam garantidos e as políticas públicas visando uma redução lenta das desigualdades estabelecidas no cenário REF não seriam prejudicadas pelo ambicioso nível de mitigação alcançado.

No Cenário 1,5°C, uma parte dos ganhos de renda familiar em relação a 2015 é absorvida por um aumento do nível de preços maior do que no REF, conforme apresentado anteriormente. A Tabela 3, a seguir, apresenta a evolução da renda e do poder de compra das famílias, por classe de renda, nos dois cenários.

**Tabela 3.** Evolução da renda e do poder de compra das famílias, por classe de renda (base 2015 = 1)

Renda Anual Média per capita	Cenário	2015	REF 2030	1,5°C 2030	REF 2050	1,5°C 2050
<b>Classe 1 (10% mais pobres)</b>	Renda (2015=1)	1	1,60	1,57	5,35	5,31
	Poder de Compra (2015=1)		1,50	1,19	4,78	4,20
<b>Classe 2 (20% seguintes)</b>	Renda (2015=1)	1	1,51	1,48	2,58	2,56
	Poder de Compra (2015=1)		1,40	1,10	2,30	2,01
<b>Classe 3 (20% seguintes)</b>	Renda (2015=1)	1	1,39	1,36	2,41	2,40
	Poder de Compra (2015=1)		1,27	1,01	2,11	1,85
<b>Classe 4 (20% seguintes)</b>	Renda (2015=1)	1	1,49	1,46	2,59	2,57
	Poder de Compra (2015=1)		1,36	1,08	2,24	1,98
<b>Classe 5 (20% seguintes)</b>	Renda (2015=1)	1	1,38	1,35	2,09	2,07
	Poder de Compra (2015=1)		1,24	0,99	1,78	1,57
<b>Classe 6 (10% mais ricos)</b>	Renda (2015=1)	1	1,35	1,33	2,16	2,14
	Poder de Compra (2015=1)		1,19	0,97	1,79	1,61

Para cada classe de renda familiar, foi calculado o aumento de preços de sua cesta de consumo de bens e serviços, permitindo verificar o crescimento líquido do poder de compra de cada classe. Dessa forma, verifica-se que:

- O poder de compra aumenta em todos os cenários e em todos os períodos de forma significativa para a classe 1, a mais pobre, em relação a 2015.
- No período 2015-2030, o aumento do nível de preços é grande no Cenário 1,5°C, e em 2030 o poder de compra aumenta moderadamente nas classes 1 a 4, mas se reduz marginalmente nas classes 5 e 6 em relação a 2015.
- No período 2030-2050 há um alívio no índice de preços no Cenário 1,5°C, e em 2050 o poder de compra aumenta fortemente para todas as classes, tanto em relação a 2015 quanto a 2030.
- Em 2050, no Cenário 1,5°C, o poder de compra de todas as classes é significativamente aumentado em relação a 2015, mas reduzido em relação ao verificado no REF nesse ano.

Em síntese, o estudo permite duas conclusões principais:

- a) Um cenário de implantação plena da NDC brasileira através de políticas públicas adequadas é compatível com uma melhora acentuada nos indicadores econômicos e sociais do país, além de propiciar uma significativa redução de emissões de GEE, permitindo o cumprimento dos compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris.
- b) Uma estratégia de desenvolvimento do Brasil no longo prazo compatível com a limitação do aumento da temperatura global a 1,5°C não implicaria necessariamente em consequências econômicas e sociais significativamente negativas para o país, se implantada através de políticas públicas apropriadas.

O potencial de recursos naturais renováveis faz com que os benefícios e oportunidades da transição para uma economia de baixo carbono sejam particularmente importantes no caso do Brasil, que detém posição privilegiada de competitividade em relação aos demais países, no cenário de um esforço mundial para alcançar os objetivos de longo prazo do Acordo de Paris.

O Cenário 1,5°C aqui desenhado é apenas um dentre vários outros a serem explorados. O progresso técnico das opções de mitigação, a evolução dos comportamentos e as mudanças estruturais nos padrões de consumo abrem possibilidades ainda mais amplas de uma estratégia de desenvolvimento de baixa emissão de GEE a serem exploradas.

Análises de sensibilidade são essenciais para que se possa avaliar se as principais conclusões do estudo se manteriam mesmo que importantes parâmetros para a modelagem, como a taxa de desconto considerada no estudo (8% ao ano) e a trajetória do preço do petróleo utilizada (87USD/barril em valores de 2015, a partir de 2020) variem no horizonte estudado. No World Energy Outlook, publicado em dezembro de 2017, após a realização de nosso estudo, a Agência Internacional de Energia reviu sua estimativa para a trajetória de preços do petróleo mais baixos em seu cenário de Desenvolvimento Sustentável, em torno do patamar de 60USD/barril a partir de 2020. Este preço do petróleo mais baixo tende a elevar os custos marginais de abatimento. Já uma taxa de desconto mais baixa tende a diminuir os custos marginais de abatimento, pois a maior parte das medidas de mitigação têm custos de capital (Capex) maiores. Foram realizadas análises de sensibilidade dos resultados da avaliação microeconômica a estes dois parâmetros, apresentadas na seção 8 deste relatório.

As implicações macroeconômicas e sociais da transição para uma economia de baixo carbono dependem não só dos custos das opções de mitigação, mas também dos instrumentos usados para viabilizar sua adoção: econômicos, financeiros, de comando e

controle, ou uma mistura deles. No Cenário 1,5°C aqui apresentado foi utilizada uma taxa sobre a queima de combustíveis fósseis, que começou em zero em 2020, e foi crescendo linearmente até 100USD/tCO<sub>2e</sub> em 2030, se mantendo constante neste patamar até 2050. É interessante testar também outros valores de taxa de carbono, além de outros instrumentos, como por exemplo, um mercado de cotas comercializáveis de emissões de GEE, ou condições favorecidas de crédito para os projetos de mitigação, para viabilizar o ambicioso Cenário 1,5°C aqui desenhado. Estas questões devem ser consideradas em próximos estudos sobre o tema.

## 2. Setor de Transportes

### 2.1 Cenário de Referência

O Cenário de Referência demonstra os prognósticos de atividade e participação que consideram uma evolução tendencial do setor de transportes, considerando os diversos estudos governamentais como Plano Setorial de Transporte e Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima (PSTM), Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT), Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2026 e a nota técnica do Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050). Consideraram-se, também, programas em andamento como o RenovaBio e o Rota 2030 (que sucederá o programa Inovar-Auto). Portanto, com base na evolução do transporte de passageiros e de carga (Tabela 4), estimou-se a demanda por tipo de energia (Tabela 5).

**Tabela 4.** Evolução do momento de transporte no Cenário de Referência ( $10^6$ p.km e  $10^6$ t.km)

Ano	Aéreo <sup>1</sup>	Aquático <sup>1</sup>	Ferrovário <sup>1</sup>	Rodoviário <sup>1</sup>	Dutoviário <sup>2</sup>	Aéreo <sup>2</sup>	Ferrovário <sup>2</sup>	Rodoviário <sup>2</sup>	Aquático <sup>2</sup>
2010	96.700	1.196	27.352	1.476.161	32.438	1.054	277.930	633.783	173.024
2020	125.350	1.225	38.879	1.721.872	30.486	1.541	327.807	729.709	124.557
2030	183.450	1.738	54.689	2.067.668	35.514	2.314	398.131	838.870	246.265
2040	250.153	2.430	72.544	2.454.346	41.881	3.440	553.382	988.958	352.533
2050	315.727	3.470	98.534	3.051.793	53.413	5.341	824.434	1.249.336	538.139

<sup>1</sup>  $10^6$ p.km; <sup>2</sup>  $10^6$ t.km.

**Tabela 5.** Demanda energética de transporte no Cenário de Referência (mil tep)

Ano	Biodiesel	Diesel	Etanol anidro	Etanol hidratado	Eletricidade	Gasolina A	GNV	Óleo combustível	Querosene
2010	1.563	32.217	3.690	8.166	238	17.108	1.767	852	3.228
2020	3.611	34.972	5.636	9.326	279	22.012	1.610	668	3.361
2030	4.931	39.093	4.077	17.641	475	15.947	1.905	1.235	4.747
2040	6.974	43.010	3.343	24.414	1.320	13.103	2.223	1.630	6.182
2050	8.172	50.813	2.472	28.225	2.900	9.720	2.156	2.306	7.587

### 2.2 Cenário 1,5°C

Para o Cenário 1,5°C, além dos prognósticos realizados para o Cenário de Referência, consideraram-se novos incentivos e investimentos como:

- Transporte de passageiros: eletromobilidade; maior participação do transporte metroviário de passageiros; aumento da frota circulante de veículos compartilhados; maior participação dos biocombustíveis (incluindo novos como o bioquerosene); incentivo ao transporte ativo (não motorizado) e aos veículos com sistema de propulsão alternativos (elétricos e híbridos);

- Transporte de carga: busca pelo equilíbrio da divisão modal por meio de investimentos em infraestrutura e políticas públicas; eletrificação das ferrovias; renovação da frota de caminhões; maior penetração de comerciais leves, caminhões semileves e leves elétricos à bateria (BEV); maior penetração de caminhões médios com sistema de propulsão híbridos elétricos; aumento da eficiência logística e da participação do biodiesel e introdução do bioquerosene e do bio-óleo.

Desta forma, com base na evolução do transporte de passageiros e de carga, apresentada na Tabela 6, elaborou-se a demanda por tipo de energia (Tabela 7).

**Tabela 6.** Evolução do momento de transporte no Cenário 1,5°C (10<sup>6</sup>p.km e 10<sup>6</sup>t.km)

Ano	Aéreo <sup>1</sup>	Aquático <sup>1</sup>	Ferrovário <sup>1</sup>	Rodoviário <sup>1</sup>	Dutoviário <sup>2</sup>	Aéreo <sup>2</sup>	Ferrovário <sup>2</sup>	Rodoviário <sup>2</sup>	Aquático <sup>2</sup>
2010	96.700	1.196	27.352	1.476.161	32.438	1.054	277.930	633.783	173.024
2020	125.350	1.225	38.879	1.703.832	30.486	1.541	317.973	707.818	124.557
2030	167.989	1.752	66.919	2.005.796	35.515	2.314	409.705	753.052	260.107
2040	212.352	2.445	125.076	2.311.804	41.881	3.440	575.208	824.253	394.506
2050	277.562	3.470	225.519	2.745.676	53.413	5.341	861.297	967.261	614.253

<sup>1</sup> 10<sup>6</sup>p.km; <sup>2</sup>10<sup>6</sup>t.km.

**Tabela 7.** Demanda energética de transporte no Cenário 1,5°C (mil tep)

Ano	Biodie- sel	Bioque- rosene	Bio- óleo	Diesel	Etanol anidro	Etanol hidratado	Eletricidade	Gasolina A	GNV	Óleo combustível	Quero- sene
2010	1.563	–	–	32.217	3.690	8.166	238	17.108	1.767	851	3.228
2020	3.611	–	–	34.972	5.636	9.326	279	22.012	1.610	667	3.361
2030	7.727	397	83	33.348	3.597	15.873	852	14.077	1.518	1.174	3.830
2040	8.831	728	164	28.847	1.772	19.474	3.553	6.978	364	1.576	4.418
2050	9.481	1.226	356	24.386	419	19.206	7.676	1.714	–	2.158	5.252

## 2.3 Comparação dos Resultados

No Cenário de Referência, em 2050, a participação de combustíveis fósseis no transporte de carga atingiria 87% do total demandado e no transporte de passageiros, 43%. No Cenário 1,5°C, tais participações seriam reduzidas para 71% (transporte de carga) e 25% (transporte de passageiros). As reduções no transporte de carga decorrem do aumento da participação dos biocombustíveis (26%) e da introdução da energia elétrica (3%) em parte das ferrovias e a participação de VUCs elétricos. Já no transporte de passageiros, as reduções são justificadas em decorrência do aumento da participação dos biocombustíveis (58%) e do aumento da participação da energia elétrica (17%) devido a maior participação de veículos elétricos.

A Tabela 8 apresenta a evolução das emissões de CO<sub>2</sub>e do Cenário de Referência e do Cenário 1,5°C. Evidencia-se uma redução de 121.540 GgCO<sub>2</sub>e em 2050 no Cenário 1,5°C em relação ao Cenário de Referência. O modo rodoviário apresenta a maior redução (60%), sobretudo devido ao aumento da eletromobilidade e a ganhos de eficiência (carga e passageiros), seguido do aéreo (29%), ferroviário (28%) e aquático (13%).

**Tabela 8.** Emissões de GEE de transporte total no Cenário de Referência e no Cenário 1,5°C (Gg CO<sub>2</sub>e)

Ano	Cenário de Referência					Cenário 1,5°C				
	Rodoviário	Ferrovário	Aéreo	Aquático	Total	Rodoviário	Ferrovário	Aéreo	Aquático	Total
2010	153.628	2.959	9.865	4.065	170.517	153.628	2.959	9.865	4.065	170.517
2020	176.637	2.630	10.248	2.874	192.389	176.637	2.630	10.248	2.874	192.389
2030	171.789	3.063	14.473	5.403	194.729	147.496	2.715	11.709	5.076	166.995
2040	175.592	3.758	18.848	7.763	205.962	108.575	3.018	13.528	7.236	132.357
2050	187.811	5.059	23.126	11.749	227.745	75.951	3.629	16.461	10.164	106.205

## 2.4 Cenário Disruptivo (a ser desenvolvido)

A proposta inicial de premissas para o Cenário Disruptivo foi realizada com base em medidas de mitigação apostadas pela literatura especializada e em tendências mercadológicas. As principais medidas acordadas com a CEC e suas respectivas penetrações ao longo do horizonte são apresentadas na Tabela 9.

**Tabela 9.** Principais medidas de mitigação para o setor de transporte em um Cenário Disruptivo

Medidas de mitigação	Penetração da tecnologia
Frota compartilhada.	Redução das viagens: 10% em 2020 e 40% em 2050.
Transporte ativo.	Participação na divisão modal 15% de transporte urbano em 2050.
Escalonamento de horários (com aumento do <i>home office</i> ).	Redução do padrão das viagens urbanas no horário de pico: 17% em 2050.
Uso de Sistemas de informação.	Redução em 5% a 10% das viagens nos principais trechos (RJ-SP-DF) em 2050.
Desestímulo ao uso de veículos MCI (com incentivo ao uso de fontes limpas).	Encerramento das vendas de veículos MCI em 2040.
Qualificação da frota de ônibus.	70% da frota de ônibus urbano tipo BEV em 2050.
Sistema de certificação para o transporte de carga.	15% de melhoria na eficiência energética atual em 2050.
Caminhões leves a etanol.	Participação de 50% da frota circulante em 2050.
<i>Hyperloop</i> para transporte de carga.	Diminuição da participação de veículos de carga (médios e pesados).
Dirigível para transporte de carga	
Eletrificação das ferrovias para transporte de carga.	Participação de 25% da atividade de transporte em 2050.
Uso de <i>Drones</i> (VANT) para transporte de carga.	Substituição de uma fração dos VUCs em operações de last mile.

### 3. Setor de Indústria

#### 3.1 Cenário de Referência

No Cenário de Referência, estimaram-se as emissões de GEE do consumo de energia dos diversos segmentos com base nas respectivas taxas de crescimento e nos ganhos de eficiência esperados bem como as emissões de processos *e.g.* durante a calcinação do cimento, na redução de minério de ferro; da fuga de gases fluorados refrigerantes em aparelhos de ar condicionado/refrigeração, entre outros onde a evolução tecnológica esperada dos segmentos foi considerada. A Tabela 10 apresenta os valores para a taxa de crescimento anual do nível de atividade dos segmentos industriais e a Tabela 11, o consumo de energia por combustível entre 2015 e 2050. Neste Cenário, o consumo energético teria um aumento de 106% no período analisado.

**Tabela 10.** Evolução da taxa de crescimento anual do nível de atividade dos diversos segmentos industriais (%)

Segmento industrial	Taxa de crescimento anual do nível de atividade	
	2015-2030	2030-2050
Alimentos e bebidas	0,99%	2,42%
Papel e Celulose	0,63%	3,49%
Cimento	1,25%	2,26%
Siderurgia	0,37%	2,50%
Não Ferrosos	0,05%	2,29%
Química	0,38%	1,96%
Mineração	-0,01%	1,92%
Resto da Indústria	0,69%	2,86%

**Tabela 11.** Demanda energética do setor industrial no Cenário de Referência (mil tep)

Combustível	2010	2020	2030	2040	2050
Eletricidade	17.488	17.884	22.503	29.218	37.832
Gás Natural Úmido e Seco	9.274	10.075	11.607	14.933	19.182
Querosene Iluminante	3	9	11	14	18
GLP	702	1.194	1.417	1.841	2.355
Óleo Combustível	3.236	2.533	3.349	4.223	5.328
Carvão Vapor sesp e 3100 a 3700	1.700	1.600	2.185	2.668	3.287
Coque de Carvão Mineral	7.516	7.858	8.984	11.420	14.602
Lenha	7.164	7.818	9.106	11.898	15.245
Carvão Vegetal	4.045	3.534	4.205	5.325	6.784
Outras Primárias Renováveis	562	782	937	1.338	1.862
Bagaço de Cana	17.289	15.940	22.320	29.154	35.994
Outros Energéticos de Petróleo	2.385	2.576	2.758	3.548	4.511

Combustível	2010	2020	2030	2040	2050
Carvão Vapor 5900	1.904	2.067	2.284	2.855	3.589
Lixívia	5.757	6.604	7.533	10.532	14.360
Gás de Coqueria	1.250	1.097	1.234	1.569	2.007
Biodiesel	-	106	171	261	329
Alcatrão	95	189	213	271	346
Diesel	725	996	1.339	1.642	2.069
Outras primárias não renováveis	286	386	432	517	625
Coque de petróleo	4.452	4.830	5.820	6.933	8.392
<b>Total</b>	<b>85.832</b>	<b>88.078</b>	<b>108.409</b>	<b>140.160</b>	<b>178.715</b>

### 3.2 Cenário 1,5°C

No Cenário 1,5°C, estimou-se o consumo energético e as respectivas emissões de GEE provenientes tanto do consumo energético quanto dos processos industriais adotando-se medidas mais drásticas de eficiência energética e de melhorias nos processos. Em linhas gerais, foram considerados equipamentos mais eficientes, aperfeiçoamentos no controle dos processos e na recuperação de calor, uso de aditivos no segmento de produção de cimento, substituição dos gases fluorados por gases de menor potencial de aquecimento global, e substituição dos combustíveis fósseis mais carbono-intensivos por outros menos carbono-intensivos e biomassa, entre outras medidas. Na Tabela 12 são apresentados os resultados para o consumo energético industrial entre 2015 e 2050 no Cenário 1,5°C. Nota-se que, neste cenário, o consumo energético passa dos 85,92 milhões de tep, em 2015, para 136,16 milhões de tep em 2050, um aumento de 58%.

**Tabela 12.** Demanda energética do setor industrial no Cenário 1,5°C (mil tep)

Segmento industrial	2015	2020	2030	2040	2050
Eletricidade	17.488	17.239	20.734	25.795	32.065
Gás Natural Úmido e Seco	9.274	10.315	12.184	16.083	21.537
Querosene Iluminante	3	9	10	12	15
GLP	702	1.161	1.297	1.586	1.927
Óleo Combustível	3.236	2.053	1.957	1.621	746
Carvão Vapor s/esp. e 3100 a 3700	1.700	1.515	1.783	1.957	2.209
Coque de Carvão Mineral	7.516	7.319	6.865	7.010	7.230
Lenha	7.164	7.622	8.273	10.044	12.092
Carvão Vegetal	4.045	3.571	4.052	4.798	5.715
Outras Primárias Renováveis	562	768	867	1.165	1.527
Bagaço de Cana	17.289	15.846	20.877	24.695	27.750
Outros Energéticos de Petróleo	2.385	2.268	1.771	1.458	857
Carvão Vapor 5900	1.904	1.999	1.964	2.133	2.342

Segmento industrial	2015	2020	2030	2040	2050
Lixívia	5.757	6.486	6.858	8.595	10.548
Gás de Coqueria	1.250	1.052	1.031	1.117	1.222
Biodiesel	-	103	155	222	265
Alcatrão	95	181	178	193	211
Diesel	725	968	1.209	1.397	1.667
Outras primárias não renováveis	286	375	386	434	498
Coque de petróleo	4.452	4.595	4.905	5.250	5.738
<b>Total</b>	<b>85.832</b>	<b>85.443</b>	<b>97.355</b>	<b>115.564</b>	<b>136.163</b>

### 3.3 Comparação dos Resultados

A Tabela 13 apresenta os resultados referentes às emissões de GEE entre 2010 e 2050 para os Cenários de Referência e 1,5°C, provenientes do consumo de combustíveis fósseis para uso energético ou dos processos industriais.

**Tabela 13.** Emissões de GEE do setor industrial no Cenário de Referência e no Cenário 1,5°C (Gg CO<sub>2</sub>e)

Cenário	Fonte de emissão industrial	Emissões (Gg CO <sub>2</sub> e)				
		2010	2020	2030	2040	2050
Referência	Energia	70.786	72.200	85.501	107.034	134.592
	Processo	90.829	95.344	120.845	153.006	192.200
	<b>Total</b>	<b>161.614</b>	<b>167.544</b>	<b>206.345</b>	<b>260.040</b>	<b>326.792</b>
1,5°C	Energia	70.786	68.923	73.996	84.762	97.742
	Processo	90.829	90.996	100.554	106.156	114.929
	<b>Total</b>	<b>161.614</b>	<b>159.920</b>	<b>174.550</b>	<b>190.918</b>	<b>212.671</b>

No Cenário de Referência as emissões cresceriam 102% no período 2010-2050, enquanto no Cenário 1,5°C o crescimento seria de 32%. Já a mitigação do Cenário 1,5°C em relação ao de referência seria de 35%, em 2050.

### 3.4 Cenário Disruptivo (a ser desenvolvido)

Para o Cenário Disruptivo da indústria, serão analisadas medidas de mitigação e eficiência energética que apresentam grandes potenciais de abatimento de GEE, como a utilização de equipamentos mais eficientes e novos processos industriais que ainda se encontram em fase de desenvolvimento. Destaca-se, neste cenário, a utilização de processos com captura e armazenamento de carbono como uma importante medida para a redução de GEE em diversos segmentos industriais, cimentos geopoliméricos ou a base de calcário/magnésio, rotas bioquímicas na indústria química, entre outras

## 4. Oferta de Energia

Os Cenários de oferta foram simulados com o Modelo Matriz, desenvolvido pelo CEPEL, que otimiza a expansão de todas as cadeias energéticas, a partir de demanda de energia dos setores da indústria, transportes, agropecuário, residencial e de serviços.

### 4.1 Cenário de Referência

No Cenário de Referência foram consideradas medidas de expansão de fontes renováveis, como eólica, solar fotovoltaica (tanto na forma distribuída como centralizada) e biomassa (principalmente bagaço de cana-de-açúcar, mas também florestas energéticas). Quanto às fontes não renováveis, houve pequena expansão da geração nuclear e a carvão mineral, além de reposição de usinas que chegarão ao final da vida útil. Já o gás natural apresentou maior aumento de capacidade, chegando a, aproximadamente, 30 GW em 2050.

Em relações aos biocombustíveis, assumiu-se que haverá uma expansão suficiente para atender o demandado pelo setor de transportes. A Tabela 14 resume a oferta interna de energia no Cenário de Referência.

**Tabela 14.** Evolução da oferta interna de energia no Cenário de Referência (mil tep)

	2020	2030	2040	2050
<b>Energia não renovável</b>	<b>154.000</b>	<b>178.566</b>	<b>213.438</b>	<b>257.237</b>
Petróleo e derivados	101.469	110.783	123.725	141.034
Gás natural	32.503	41.424	55.466	71.075
Carvão mineral e coque	16.043	19.210	26.059	34.649
Urânio	3.684	6.799	7.720	9.857
Outras não renováveis	301	350	468	622
<b>Energia renovável</b>	<b>143.853</b>	<b>184.544</b>	<b>234.036</b>	<b>278.148</b>
Hidráulica	40.975	45.283	52.553	56.848
Lenha e carvão vegetal	21.352	25.568	32.850	42.219
Derivados da cana	57.824	79.775	98.309	110.341
Outras renováveis	23.702	33.919	50.325	68.740
<b>TOTAL</b>	<b>297.853</b>	<b>363.111</b>	<b>447.474</b>	<b>535.385</b>

## 4.2 Cenário “1,5°C”

No Cenário 1,5°C, considerou-se que todas as termelétricas com fonte primária não-renovável (exceto nuclear) seriam descomissionadas até 2050. Em relação ao Cenário de Referência, este cenário tem maior participação de biomassa plantada e solar (tanto fotovoltaica como heliotérmica) e menor participação, embora ainda significativa, da fonte eólica. Além de medidas de eficiência energética pelo lado da demanda, haveria a tendência a maior eletrificação da economia, inclusive no setor de transportes. Assim, há uma combinação de maior demanda de energia elétrica com a expansão de fontes renováveis intermitentes. Essa maior necessidade de flexibilidade poderia ser suprida pelas hidrelétricas, pelas termelétricas à biomassa e pelas heliotérmicas. Adicionalmente, considera-se a possibilidade de repotenciação de hidrelétricas e uso de sistemas de armazenamento, como baterias e hidrelétricas reversíveis. Quanto às emissões fugitivas no setor de petróleo e gás natural, são consideradas medidas mais ambiciosas para sua redução. A Tabela 15 mostra os resultados de oferta interna de energia do Cenário 1,5°C.

**Tabela 15.** Evolução da oferta interna de energia no Cenário 1,5°C (mil tep)

	2020	2030	2040	2050
<b>Energia não renovável</b>	<b>151.988</b>	<b>156.063</b>	<b>155.663</b>	<b>157.257</b>
Petróleo e derivados	99.907	93.468	88.166	83.517
Gás natural	32.813	39.949	47.105	54.240
Carvão mineral e coque	15.306	15.715	14.506	13.665
Urânio	3.684	6.625	5.496	5.342
<b>Outras não renováveis</b>	<b>278</b>	<b>305</b>	<b>389</b>	<b>493</b>
<b>Energia renovável</b>	<b>142.242</b>	<b>185.965</b>	<b>234.557</b>	<b>280.341</b>
Hidráulica	40.694	43.132	49.640	56.541
Lenha e carvão vegetal	21.210	26.885	43.354	59.949
Derivados da cana	57.784	76.042	87.980	96.794
Outras renováveis	22.554	39.906	53.584	67.057
<b>TOTAL</b>	<b>294.229</b>	<b>342.027</b>	<b>390.220</b>	<b>437.598</b>

## 4.3 Comparação dos Resultados

O total de emissões do setor energético, incluindo fugitivas, foi 105.617 e 184.662 Gg de CO<sub>2</sub>e em 2030 e 2050, respectivamente, no Cenário de Referência e 95.830 e 80.902 Gg de CO<sub>2</sub>e no Cenário “1,5°C”. As informações detalhadas por setor e por ano em ambos os Cenários podem ser vistas na Tabela 16.

**Tabela 16.** Emissões de GEE da oferta de energia no Cenário de Referência e no Cenário 1,5°C (Gg CO<sub>2</sub>e)

Cenário de Referência	2010	2020	2030	2040	2050
Transformações do setor elétrico	36.566	32.019	42.386	63.492	87.599
Consumo do setor energético	23.900	27.901	33.379	41.088	50.796
Fugitivas	20.384	25.468	29.284	39.189	45.446
Carvoaria	687	493	567	661	821
<b>Total</b>	<b>81.537</b>	<b>85.882</b>	<b>105.617</b>	<b>144.431</b>	<b>184.662</b>
Cenário 1,5°C	2010	2020	2030	2040	2050
Transformações do setor elétrico	36.566	32.019	36.780	26.161	6.890
Consumo do setor energético	23.900	27.262	30.594	34.286	39.444
Fugitivas	20.384	25.457	27.908	32.904	33.870
Carvoaria	687	497	548	601	699
<b>Total</b>	<b>81.537</b>	<b>85.236</b>	<b>95.830</b>	<b>93.952</b>	<b>80.902</b>

A Tabela 17 mostra a evolução do fator de emissão do setor elétrico para ambos os Cenários.

**Tabela 17.** Evolução do fator de emissão do setor elétrico no Cenário de Referência e no Cenário 1,5°C (kgCO<sub>2</sub>e/MWh)

kgCO <sub>2</sub> e/MWh	2010	2020	2030	2040	2050
<b>Cenário de Referência</b>	51,2	55,5	58,1	67,6	75,0
<b>Cenário 1,5°C</b>	51,2	56,2	51,8	28,5	6,0

Observa-se grande redução nas emissões, principalmente nas transformações do setor elétrico. As emissões em 2050 desse setor referem-se a processos de autoprodução de energia elétrica e a gases não-CO<sub>2</sub>, provenientes de geração à biomassa. As emissões fugitivas apresentariam diminuição por considerações de melhorias nos processos. Já as emissões do consumo do setor energético e das carvoarias apresentariam redução apenas pela menor demanda do Cenário 1,5°C, causada pelo aumento de eficiência energética.

#### 4.4 Cenário Disruptivo (a ser desenvolvido)

Para o Cenário Disruptivo, novas tecnologias serão consideradas, inclusive a possibilidade de captura e armazenamento de carbono (CCS), proveniente também de fontes fósseis, mas principalmente de biomassa, de forma que seria possível obter valores negativos de emissão.

São esperadas alterações na demanda nesse Cenário. O uso de impressora 3D pode diminuir o consumo de alguns produtos industriais de forma que a demanda de alguns energéticos usados para sua produção pode diminuir enquanto a de outros pode aumentar. O desenvolvimento de *smart grids*, com tarifação em tempo real, também pode alterar o consumo de energia elétrica e o formato da curva de carga do sistema. Por fim, destaca-se a possibilidade de integração dos sistemas elétricos de toda a América do Sul, que pode trazer vantagens operativas.

## 5. AFOLU

O setor de Agricultura, Florestas e Outros Usos da Terra (AFOLU) é o principal emissor de gases de efeito estufa (GEE) do país. Por outro lado, é o que apresenta maior potencial de redução de emissões.

### 5.1 Cenário de Referência

O Cenário de Referência do setor de AFOLU é caracterizado pela adoção de medidas de mitigação contidas nas políticas climáticas do governo brasileiro, previstas até 2030, dentre elas o Plano Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC) e a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC). Algumas medidas foram adotadas neste estudo com flexibilização de prazos para cumprimento das metas, e a partir de 2030 não foram simulados esforços adicionais para ampliação dessas medidas.

A produção agrícola, pecuária e florestal, até 2050, foi projetada a partir de dados técnicos e econômicos do projeto IES Brasil (LA ROVERE et al., 2016); das demandas de produtos agropecuários e florestais estimadas para os setores de transporte, indústria, comercial/residencial e energia; e da projeção de PIB doméstico e mundial considerada no presente estudo. As Tabelas 18 e 19 apresentam, respectivamente, a evolução da penetração das medidas de mitigação que ocorreria no Cenário de Referência e das áreas ocupadas pela agricultura, no período de 2010 a 2050.

**Tabela 18.** Medidas de mitigação de AFOLU no Cenário de Referência (Mha)

Medida de Mitigação	Penetração (milhões de ha)				
	2010	2020	2030	2040	2050
Expansão de Floresta Econômica	6,5	6,6	7,3	9,9	13,1
Integração Pecuária Floresta	0	1,20	5,00	5,00	5,00
Restauração de Floresta Nativa	0	0,4	1,5	4,0	11,4
Incremento de C em UC e TI*	191,5	191,5	191,5	237,5	237,5
Sistema de Plantio Direto	30,8	39,3	45,9	47,6	47,8
Fixação Biológica de Nitrogênio	23,3	33,4	42,4	46,3	47,6
Recuperação de pastagens	0	7,8	15,0	22,5	30,0
Tratamento de Dejetos de Suínos**	0	0,5	0,8	1,7	4,0

\*UC –Unidade de Conservação e TI – Terras Indígenas; \*\*Milhões de toneladas

**Tabela 19.** Evolução das áreas ocupadas pela agricultura no Cenário de Referência (Mha)

Área (milhões de ha)	2010	2020	2030	2040	2050
Culturas Agrícolas	51,2	56,0	62,2	66,2	66,9
Pastagem	171,7	164,3	162,5	157,3	149,0
Floresta Econômica	6,5	6,6	10,3	12,8	16,1

\*Inclui área de floresta homogênea e área de floresta em sistema silvipastoril.

## 5.2 Cenário 1,5°C

O Cenário 1,5°C é caracterizado pela intensificação da penetração das medidas do Plano ABC e da NDC, entre 2020 e 2050, além da inclusão de medidas adicionais relacionadas ao pagamento por serviços ambientais e plantio de florestas comerciais para produção de pellets conforme Tabela 20.

Nesse cenário foram incorporados os resultados das medidas de mitigação dos setores de transporte e de energia, que resultaram em um cenário com maior demanda de biomassa florestal, de biodiesel e menor demanda de etanol. Isso implica em alterações na ocupação das áreas pela agricultura comparativamente ao Cenário de Referência, conforme demonstrado na Tabela 21.

**Tabela 20.** Medidas de mitigação de AFOLU no Cenário 1,5°C (Mha)

Medida de Mitigação	Penetração (milhões de ha)				
	2010	2020	2030	2040	2050
Expansão de Floresta Econômica	6,5	6,6	8,0	11,1	14,9
Integração Pecuária Floresta	0	1,20	5,0	10,0	15,0
Restauração de Floresta Nativa	0	1,3	2,4	6,9	21,0
Pagamento por Serviço Ambiental	0	0	0,34	1,08	3,5
Incremento de C em UC e TI*	191,5	191,5	191,5	237,5	237,5
Sistema de Plantio Direto	30,8	39,3	49,5	50,6	49,8
Fixação Biológica de Nitrogênio	23,3	33,4	52,4	55,3	56,1
Recuperação de pastagens e melhoria nas práticas agrícolas	0	7,8	20,0	40,0	60,0
Tratamento de Dejetos de Suínos**	0,0	0,5	2,4	4,5	8,1

\*UC –Unidade de Conservação e TI – Terras Indígenas; \*\*Milhões de toneladas

**Tabela 21.** Evolução das áreas ocupadas pela agricultura no Cenário 1,5°C (Mha)

Área (milhões de ha)	2010	2020	2030	2040	2050
Culturas Agrícolas	51,2	56,0	65,1	67,3	66,5
Pastagem	171,7	164,3	155,9	134,2	94,39
Floresta Econômica*	6,5	6,6	11,1	17,1	23,9

\*Inclui área de floresta homogênea e área de floresta em sistema silvipastoril.

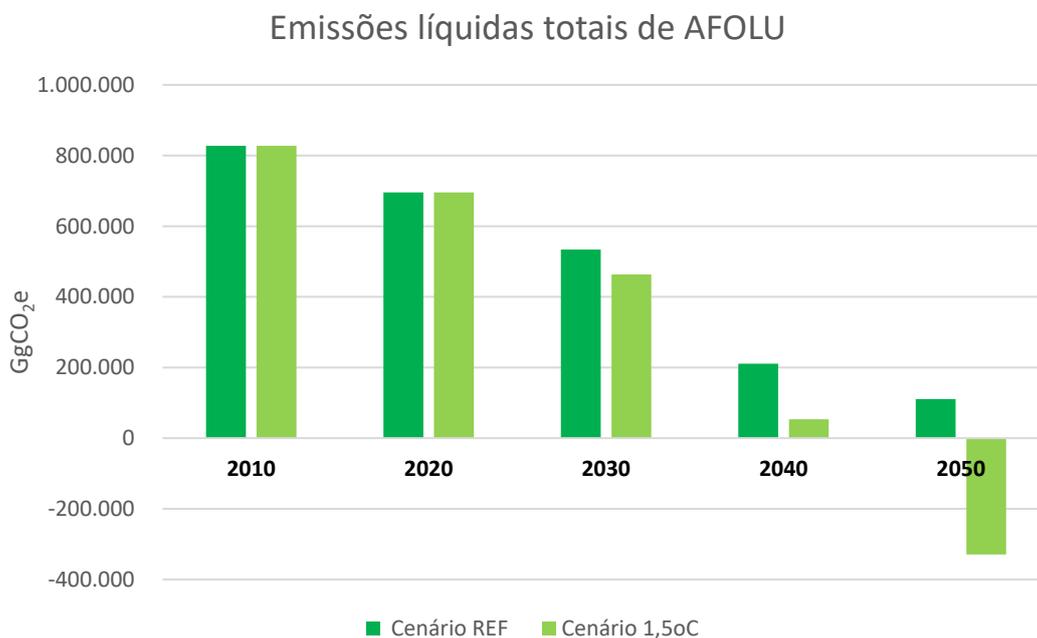
### 5.3 Comparação dos Resultados

As estimativas mostraram uma forte redução das emissões líquidas totais de AFOLU, a partir de 2020, no Cenário 1,5°C, em comparação ao Cenário de Referência, atingindo uma emissão líquida de -329.107 GgCO<sub>2</sub>e em 2050 (Tabela 22 e Figura 2). Essa redução está relacionada ao esforço adicional de mitigação, implícito neste Cenário, o qual é refletido no subsetor de Mudança de Uso da Terra e Florestas. As medidas que mais contribuíram para esta trajetória foram a contabilização do incremento anual de carbono em área de UC e TI, e o incremento de áreas de restauração de florestas nativas.

Com relação ao subsetor agropecuário, a intensificação das medidas relacionadas à recuperação de pastagens e melhoria das práticas agropecuárias proporcionou uma redução de emissões da fermentação entérica e dos solos agrícolas. Isso devido, particularmente, à recuperação de uma extensa área de pastagem degradada (60 Mha até 2050) e consequente redução do número de cabeças de gado (pela diminuição da idade de abate). A eliminação da queima de resíduos agrícolas a partir de 2030 e o aumento da adoção do sistema de plantio direto também contribuíram para a redução de emissão desse subsetor.

**Tabela 22.** Emissões líquidas de GEE do setor de AFOLU no Cenário de Referência e no Cenário 1,5°C (Gg CO<sub>2</sub>e)

Emissões totais (GgCO <sub>2</sub> e)	2010	2020	2030	2040	2050
<b>AFOLU</b>					
Cenário REF	827.747	695.459	533.664	210.621	110.315
Cenário 1,5°C	827.747	695.406	463.553	53.559	-329.107
<b>Mudança do Uso da Terra e Florestas</b>					
Cenário REF	355.006	199.845	12.205	-342.724	-474.957
Cenário 1,5°C	355.006	199.872	-36.922	-466.683	-829.488
<b>Agricultura</b>					
Cenário REF	472.741	495.613	521.459	553.345	585.272
Cenário 1,5°C	472.741	495.534	500.475	520.242	500.381



**Figura 2.** Emissões Líquidas de AFOLU no Cenário de Referência e no Cenário 1,5°C (Gg CO<sub>2</sub>e)

## 5.4 Cenário Disruptivo (a ser desenvolvido)

As tecnologias consideradas como viáveis para serem implementadas em um Cenário Disruptivo são:

1. Uso de biotecnologia: produção de “árvores sob medida” de acordo com a finalidade do plantio, como por exemplo, produção de espécies com maiores teores de celulose ou lignina e; desenvolvimento de espécies aptas para plantio em locais vulneráveis;
2. Aprimoramentos tecnológicos das operações florestais (desenvolvimento de máquinas multitarefas), visando assim reduzir mão de obra, principalmente na etapa de plantio e aumentar a produtividade;
3. Uso de veículos aéreos não tripuláveis (drones) com o objetivo de melhorar a gestão das florestas e conseqüentemente aumentar/garantir a produtividade;
4. Redução de perdas na produção agrícola, principalmente nas etapas de colheita, transporte e armazenamento, e na pecuária.
5. Produção de etanol de 2ª geração usando cana energia, objetivando maior produtividade da matéria-prima e maior rendimento do produto.

## 6. Setor Resíduos

### 6.1 Cenário de Referência

O Setor Resíduos pode ser dividido em três substratos, por porte de cidades. Nas cidades maiores, com população acima de 500 mil habitantes, e regiões metropolitanas têm-se em geral uma taxa de coleta acima de 90% com os resíduos dispostos em aterros controlados e sanitários e com maiores índices de coleta de esgotos (em torno de 50%) e tratamento em estações centralizadas (em torno de 10%). Nas cidades de porte médio, com mais de 100 mil habitantes, e pequenas cidades a eficiência de coleta não é tão alta e menos lixo é disposto em aterros sanitários e mais em lixões e o esgoto também menos coletado e mais tratado de forma descentralizada, em fossas sépticas.

Esse panorama mostra que em 2015 mais de 60% do lixo coletado ainda eram dispostos em lixões e aterros controlados, cenário contrário ao estabelecido na Política Nacional de Resíduos Sólidos que previa o encerramento de lixões e aterros controlados em 2014. Nesse cenário tão desfavorável, foi estabelecido como metas de referência o cumprimento das PNRS e PNSB de modo a reduzir a destinação inadequada dos resíduos, mantendo-se a capacidade relativa de destruição de biometano em aterros sanitários e aumentando-se em 20% os índices de coleta de esgotos e em 5% o potencial de tratamento anaeróbio com destruição de biometano nas ETE existentes. O subsetor industrial segue a tendência de geração de resíduos e esgotos em função da produção e da demanda de energia e incrementa a destruição do biometano produzido em suas ETE. A Tabela 23 mostra o nível de atividade neste cenário.

**Tabela 23.** Evolução do nível de atividade do setor de resíduos no Cenário de Referência (t de resíduos/ano e tDBO/ano)

Hipóteses Resíduos		Cenário de Referência							
		2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Resíduos Sólidos</b>									
Geração de Resíduos	kg/hab.dia	1,200	1,126	1,216	1,306	1,421	1,541	1,669	1,806
	t/ano	76.306.091	75.247.172	84.283.621	93.200.402	103.890.928	114.834.433	125.781.959	136.502.268
Coletado	%	87%	91%	96%	100%	100%	100%	100%	100%
	t/ano	63.761.370	66.262.660	78.012.920	90.404.390	100.774.200	111.389.400	122.008.500	132.407.200
Reciclagem	%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
	t/ano	2.289.183	2.257.415	2.528.509	2.796.012	3.116.728	3.445.033	3.773.459	4.095.068
Lixão	%	44%	42%	40%	35%	28%	19%	10%	5%
	t/ano	28.055.003	27.830.317	31.205.168	31.641.537	28.216.776	21.163.986	12.200.850	6.620.360
Aterro Controlado	%	19%	18%	10%	5%	2%	1%	0%	0%
	t/ano	12.114.660	11.927.279	7.801.292	4.520.220	2.015.484	1.113.894	-	-
Aterro Sanitário	%	37%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%
	t/ano	23.591.707	26.505.064	39.006.460	54.242.634	70.541.940	89.111.520	109.807.650	125.786.840
Recuperação de Metano	%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Queima de Metano	GgCH4	275,4	298,7	347,4	417,3	499,7	593,0	698,4	807,2
<b>Esgotos Domésticos</b>									
Coletado	tDBO/ano	2.043.196	2.176.906	2.285.799	3.038.682	3.314.037	3.485.305	3.613.820	3.748.993
	%	51%	53%	54%	71%	74%	78%	80%	84%
ETE anaeróbio	tDBO/ano	127.509	181.535	228.319	472.314	606.987	727.555	881.293	952.965
	%	3%	4%	5%	11%	14%	16%	20%	21%
ETE aeróbio	tDBO/ano	240.679	250.690	258.493	724.105	764.362	779.133	788.038	790.843
	%	6%	6%	6%	17%	17%	17%	18%	18%
Fossa Séptica	tDBO/ano	843.718	823.092	803.523	781.641	707.402	604.724	420.148	384.604
	%	21%	20%	19%	18%	16%	13%	9%	9%

## 6.2 Cenário 1,5°C

No Cenário 1,5°C, foram introduzidas tecnologias de tratamento térmico e biológico de RSU utilizadas em países mais desenvolvidos, considerando que com o incremento do PIB per capita do Brasil haveria, no futuro, condições similares às atuais desses países. Nessa perspectiva, chega-se ao encerramento definitivo dos aterros sanitários nas duas maiores regiões metropolitanas do país, São Paulo e Rio de Janeiro, a partir do término de suas vidas úteis. Adicionalmente, há aumento da capacidade de coleta e queima tendo sido incorporadas formas de aproveitamento do biometano produzido nos aterros, para geração de eletricidade e substituição do gás natural como combustível em usinas térmicas e veículos, reduzindo as emissões do setor energético. Analogamente, para esgotos, em relação ao Cenário de Referência, há um aumento aproveitamento do biometano gerado nas ETEs. O subsetor industrial mantém a tendência, mas também passa a utilizar o biometano capturado em suas ETEs para uso energético. A Tabela 24 mostra o nível de atividade neste Cenário.

**Tabela 24.** Evolução do nível de atividade do setor de resíduos no Cenário 1,5 °C (t de resíduos/ano e tDBO/ano)

Hipóteses Resíduos		Cenário 1,5°C						
		2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Resíduos Sólidos</b>								
Geração de Resíduos	kg/hab.dia	1,126	1,216	1,306	1,421	1,541	1,669	1,806
	t/ano	75.247.172	84.283.621	93.200.402	103.890.928	114.834.433	125.781.959	136.502.268
Coletado	%	91%	96%	100%	100%	100%	100%	100%
	t/ano	66.262.660	78.012.920	90.404.390	100.774.200	111.389.400	122.008.500	132.407.200
Reciclagem	%	4,0%	5,0%	6,0%	7,0%	8,0%	9,0%	10,0%
	t/ano	3.009.887	4.214.181	5.592.024	7.272.365	9.186.755	11.320.376	13.650.227
Lixão	%	42,0%	40,0%	35,0%	28,0%	19,0%	10,0%	5,0%
	t/ano	27.830.317	31.205.168	31.641.537	28.216.776	21.163.986	12.200.850	6.620.360
Aterro Controlado	%	18,0%	10,0%	5,0%	2,0%	1,0%	0,0%	0,0%
	t/ano	11.927.279	7.801.292	4.520.220	2.015.484	1.113.894	-	-
Aterro Sanitário	%	37,6%	41,4%	47,9%	56,1%	58,2%	65,4%	69,6%
	t/ano	24.907.934	32.330.619	43.339.074	56.560.191	64.784.658	79.739.494	92.105.914
Recuperação de Metano	%	30,0%	35,8%	41,7%	47,5%	53,3%	59,2%	65,0%
Queima de Metano	GgCH4	497,7	655,3	881,9	1.165,9	1.514,0	1.941,8	2.421,6
Geração de Eletricidade	GgCH4	99,5	173,7	278,2	416,4	592,9	814,9	1.076,3
Termoenergia	%		2,0%	3,0%	3,0%	7%	8%	8%
	t/ano		1.685.672	2.796.012	3.116.728	8.038.410	10.062.557	10.920.181
Biodigestão	%		3,0%	5,0%	6,0%	9,0%	10,0%	10,0%
	t/ano		2.528.509	4.660.020	6.233.456	10.335.099	12.578.196	13.650.227
Compostagem (cidades pequenas)	%	4,5%	6,3%	8,0%	9,8%	11,5%	13,3%	15,0%
	t/ano	1.597.130	2.461.660	3.447.528	4.631.566	5.953.352	7.427.404	9.110.518
<b>Esgotos Domésticos</b>								
Coletado	tDBO/ano	2.176.906	2.285.799	3.038.682	3.314.037	3.485.305	3.613.820	3.748.993
	%	53%	54%	71%	74%	78%	80%	84%
ETE anaeróbio	tDBO/ano	181.535	228.319	472.314	606.987	727.555	881.293	952.965
	%	4%	5%	11%	14%	16%	20%	21%
ETE aeróbio	tDBO/ano	250.690	258.493	724.105	764.362	779.133	788.038	790.843
	%	6%	6%	17%	17%	17%	18%	18%
Fossa Séptica	tDBO/ano	823.092	803.523	781.641	707.402	604.724	420.148	384.604
	%	20%	19%	18%	16%	13%	9%	9%

### 6.3 Comparação dos Resultados

Com a implementação das ações no Cenário 1,5°C o setor de resíduos terá uma redução significativa nas emissões chegando a 65% de redução no ano de 2050 em relação ao Cenário de Referência. O subsetor de resíduos sólidos reduzirá suas emissões em 73% enquanto o subsetor de efluentes, 44%. A maior redução se deve ao incremento no aproveitamento do biometano produzido nos aterros sanitários, tanto para geração de eletricidade como por substituição do gás natural em usinas térmicas ou como combustível veicular. A redução na emissão de resíduos industriais se deve à melhoria de eficiência na produção. A indústria também contribui com a redução das emissões do tratamento de efluentes com o incremento da captura de biometano para geração e consumo próprio de eletricidade. Em esgotos, a mitigação advém do aumento do tratamento anaeróbio com destruição de biometano em *flares*. A Tabela 25 mostra os resultados dessas emissões nos dois Cenários.

**Tabela 25.** Emissões de GEE do setor de resíduos no Cenário de Referência e no Cenário 1,5°C (Gg CO<sub>2</sub>e)

Cenário de Referência	2010	2020	2030	2040	2050
		<b>71.045</b>	<b>79.736</b>	<b>108.580</b>	<b>144.107</b>
<b>Resíduos sólidos</b>	<b>37.335</b>	<b>47.575</b>	<b>66.465</b>	<b>94.383</b>	<b>128.406</b>
Resíduo sólido urbano + industrial (aterros)	37.156	47.386	66.212	94.081	128.068
Resíduo sólido de saúde (incineração)	40	47	55	59	58
Resíduo sólido industrial (incineração)	138	142	198	242	280
<b>Efluentes</b>	<b>33.710</b>	<b>32.161</b>	<b>42.114</b>	<b>49.725</b>	<b>55.956</b>
Esgoto Doméstico	16.269	16.179	18.739	19.173	18.229
Efluente industrial	17.441	15.982	23.376	30.551	37.727
<b>Cenário de 1,5°C</b>	<b>71.045</b>	<b>79.736</b>	<b>76.434</b>	<b>77.863</b>	<b>65.346</b>
<b>Resíduos sólidos</b>	<b>37.335</b>	<b>47.575</b>	<b>43.720</b>	<b>44.550</b>	<b>34.155</b>
Resíduo sólido urbano + industrial (aterros)	37.156	47.386	40.977	37.930	24.998
Resíduo sólido urbano (biológico)			844	1.499	2.254
Resíduo sólido urbano (térmica)			1.701	4.891	6.645
Resíduo sólido de saúde (incineração)	40	47	55	59	58
Resíduo sólido industrial (incineração)	138	142	143	170	200
<b>Efluentes</b>	<b>33.710</b>	<b>32.161</b>	<b>32.714</b>	<b>33.313</b>	<b>31.191</b>
Esgoto Doméstico	16.269	16.179	18.163	17.559	15.152
Efluente industrial	17.441	15.982	14.551	15.755	16.039

## 6.4 Cenário Disruptivo (a ser desenvolvido)

No Cenário Disruptivo, as ações de mitigação do setor resíduos são focadas principalmente na prevenção da geração de resíduos do que no tratamento em si, seja pelo incremento de processos prévios como triagem automatizada, logística reversa, reciclagem e tratamento mecânico biológico, de modo a encaminhar somente ao tratamento aquele resíduo sem valor comercial. Processos como gaseificação e pirólise de resíduos ainda não se mostram viáveis economicamente para o Brasil nesse Cenário, tendo em vista que os demais tratamentos ainda possuem potencial de crescimento no mercado de tratamento de resíduos sólidos. E por fim, é incorporado ao processo de digestão anaeróbia de esgotos os resíduos orgânicos, acelerando a decomposição do lixo e a produção de biometano.

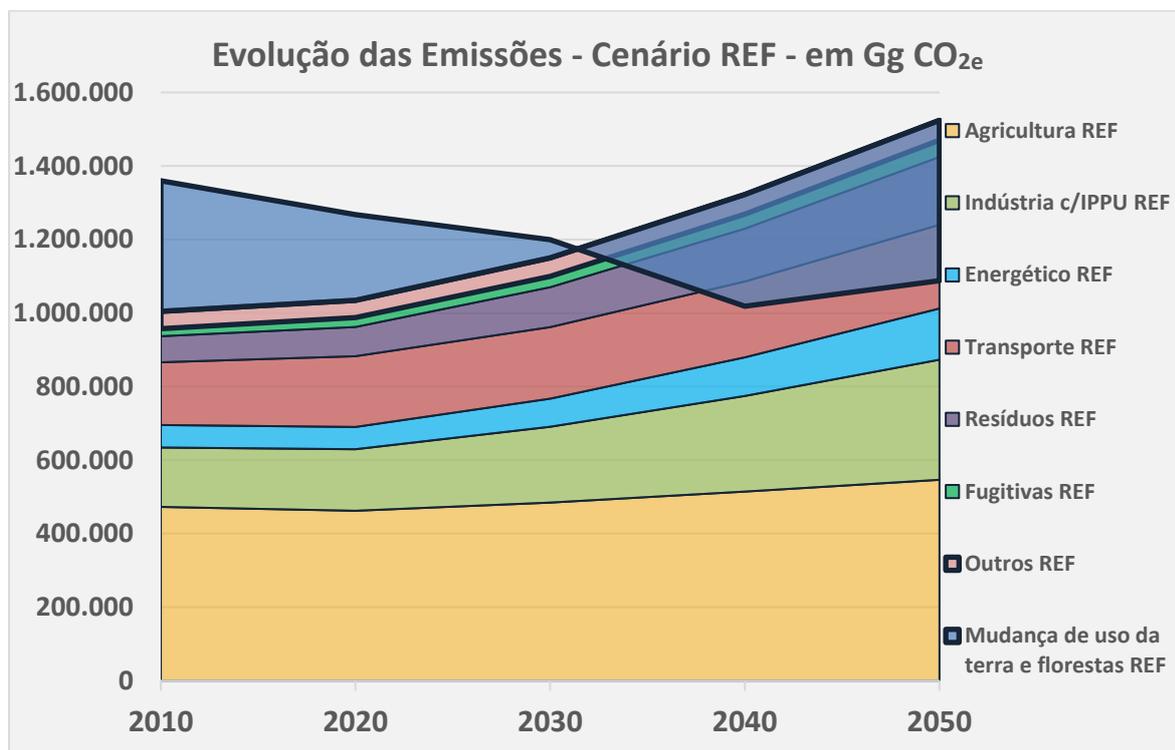
## 7. Consolidação das Emissões

As emissões do Cenário de Referência e do Cenário 1,5°C estão consolidadas na Tabela 26 e representadas nas Figuras 3 e 4. Observa-se que no Cenário de Referência, as emissões seriam reduzidas em 20% e que no Cenário 1,5 seriam reduzidas em 86%, em 2050 relativamente a 2010. Comparando-se os dois cenários, o Cenário 1,5°C emitiria 83% menos que o Cenário de Referência em 2050. Em ambos os cenários a maior mitigação adviria do setor de mudança de uso da terra e florestas, sendo que no Cenário de Referência nenhum outro setor teria suas emissões reduzidas e no Cenário 1,5 a segunda maior mitigação seria obtida no setor de transportes e a terceira no setor energético.

**Tabela 26.** Consolidação das emissões de GEE do Cenário de Referência e do Cenário 1,5°C (GgCO<sub>2</sub>e)

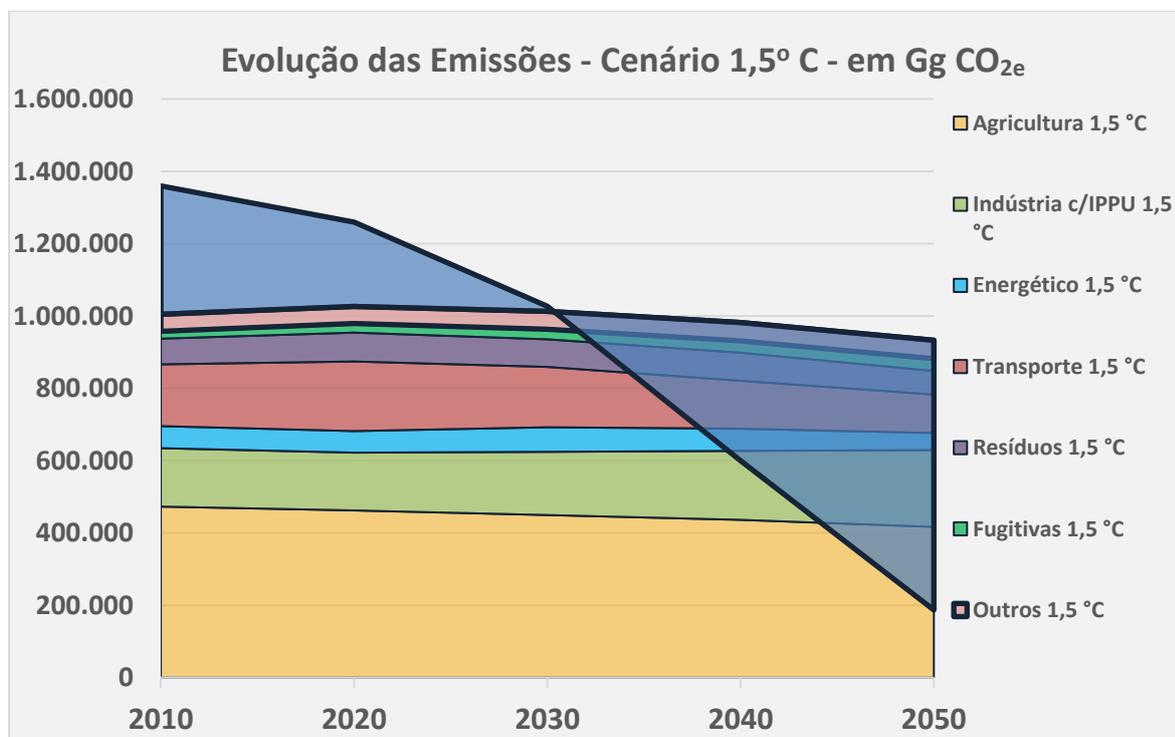
	2010	2020	2030	2040	2050	2010-2030	2010-2050
	Gg CO <sub>2</sub> e					variação	
Energético REF	61.153	60.413	76.333	105.241	139.216	25%	128%
Transporte REF	170.517	192.389	194.729	205.962	227.745	14%	34%
Indústria (Energia e Processos) REF	161.614	167.544	206.345	260.040	326.792	28%	102%
Resíduos REF	71.045	79.736	108.580	144.107	184.362	53%	160%
Mudança do uso da terra e florestas REF	355.006	199.845	12.205	- 342.724	- 474.957	-97%	-234%
Agricultura REF	472.741	495.613	521.459	553.345	585.272	10%	24%
Fugitivas REF	20.384	25.468	29.284	39.189	45.446	44%	123%
Outros REF	47.181	46.913	50.777	53.527	54.324	8%	15%
Energético 1,5 °C	61.153	59.779	67.922	61.048	47.032	11%	-23%
Transporte 1,5 °C	170.517	192.389	166.995	132.357	106.205	-2%	-38%
Indústria (Energia e Processos) 1,5 °C	161.614	159.920	174.550	190.918	212.671	8%	32%
Resíduos 1,5 °C	71.045	79.736	76.434	77.863	65.346	8%	-8%
Mudança do uso da terra e florestas 1,5 °C	355.006	199.872	- 36.922	- 466.683	- 829.488	-110%	-334%
Agricultura 1,5 °C	472.741	495.534	500.475	520.242	500.381	6%	6%
Fugitivas 1,5 °C	20.384	25.457	27.908	32.904	33.870	37%	66%
Outros 1,5 °C	47.181	46.913	49.337	50.702	50.829	5%	8%
<b>Total REF</b>	<b>1.359.641</b>	<b>1.267.922</b>	<b>1.199.711</b>	<b>1.018.687</b>	<b>1.088.199</b>	<b>-12%</b>	<b>-20%</b>
<b>Total 1,5 °C</b>	<b>1.359.641</b>	<b>1.259.599</b>	<b>1.026.699</b>	<b>599.350</b>	<b>186.846</b>	<b>-24%</b>	<b>-86%</b>

Nota: "Outros" inclui emissões dos setores residencial, comercial, serviços e agricultura (energia).



Nota: "Outros" inclui emissões dos setores residencial, comercial, serviços e agricultura (energia).

**Figura 3.** Consolidação das emissões do cenário de Referência- 2010 -2050 (Gg CO<sub>2</sub>e)



Nota: "Outros" inclui emissões dos setores residencial, comercial, serviços e agricultura (energia).

**Figura 4.** Consolidação das emissões do cenário 1,5°C - 2010 -2050 (Gg CO<sub>2</sub>e)

## 8. Avaliação Microeconômica

### 8.1 Metodologia de Cálculo dos Custos Marginais de Abatimento

A análise dos custos marginais de abatimento de emissões de GEE consiste em estimar o custo de abatimento (dispêndios totais menos receitas) de uma unidade de emissões (tonelada de GEE) no Cenário 1,5°C relativamente ao Cenário de Referência. A análise é realizada individualmente para cada uma das medidas de mitigação contempladas, a qual pode ser a adoção de uma tecnologia totalmente nova ou simplesmente o aumento da penetração de alguma medida. O resultado se expressa em US\$/tCO<sub>2</sub>e evitado, valor que se multiplica pela quantidade total de emissões evitadas para se obter o custo total da medida de mitigação analisada.

Os dispêndios são classificados em duas categorias:

- (a) despesas de capital: investimentos em bens de capital (máquinas, equipamentos e qualquer tipo de capital físico);
- (b) despesas operacionais, nas quais estão incluídos gastos manutenção, mão de obra, combustível, entre outros.

A avaliação de investimentos em bens de capital deve levar em consideração a vida útil dos equipamentos adquiridos, que por vezes pode se estender para além do período considerado, além do custo de oportunidade de tal investimento, dado que geralmente se tratam de altos montantes requeridos no início do período. Deste modo, faz-se necessária uma abordagem que considere o custo de investimento nivelado, isto é, capaz de diluir tais investimentos ao longo do período em vigência.

A análise dos custos operacionais dispensa tal abordagem, uma vez que estes são apreciados ao longo do período, no caso deste estudo, anualmente.

O custo marginal de abatimento é calculado a partir da metodologia apresentada em Gouvello et al (2009), explicada a seguir:

$$AC_n^{Atividade} = \frac{ANC_n^{abatimento} - ANC_n^{referência}}{AE_n^{referência} - AE_n^{abatimento}}$$

$AC_n^{Atividade}$  = Custo de abatimento de atividade/tecnologia de mitigação de GEE para o ano n

$ANC_n^{abatimento}$  = Custo anual líquido da tecnologia de abatimento para o ano n

$ANC_n^{referência}$  = Custo anual líquido da tecnologia usada no Cenário de Referência para o ano n

$AE_n^{abatimento}$  = Emissão anual de GEE com tecnologia de abatimento para o ano n

$AE_n^{referência}$  = Emissão anual de GEE com tecnologia usada no Cenário de Referência para o ano n

$$ANC_n = \frac{INV \cdot r \cdot \frac{(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} + AOMC_n + AFC_n - AREV_n}{(1+r)^{(n-anobase)}}$$

$ANC_n$  = Custo anual líquido da tecnologia de abatimento ou do Cenário de Referência para o ano n

$INV$  = Investimento total ou custo de capital da tecnologia de abatimento ou do Cenário de Referência

$AOMC_n$  = Custo anual de operações e manutenção da tecnologia de abatimento ou do Cenário de Referência

$AFC_n$  = Custo anual de combustíveis da tecnologia de abatimento ou do Cenário de Referência

$AREV_n$  = Receita anual gerada pela tecnologia de abatimento ou do Cenário de Referência

$r$  = Taxa de desconto

$t$  = Vida útil da tecnologia

$n$  = Ano

$$AAAC^{Atividade} = \frac{\sum_n AC_n^{Atividade} \times MIT_n^{Atividade}}{\sum_n MIT_n^{Atividade}}$$

$AAAC^{Atividade}$  = Custo de abatimento anual médio da atividade/tecnologia de mitigação de GEE no período

$AC_n^{Atividade}$  = Custo de abatimento da atividade/tecnologia de mitigação de GEE no ano n

$MIT_n^{Atividade}$  = Mitigação de GEE da atividade/tecnologia no ano n

## 8.2 Custos de Abatimento das Opções de Mitigação do Cenário 1,5°C

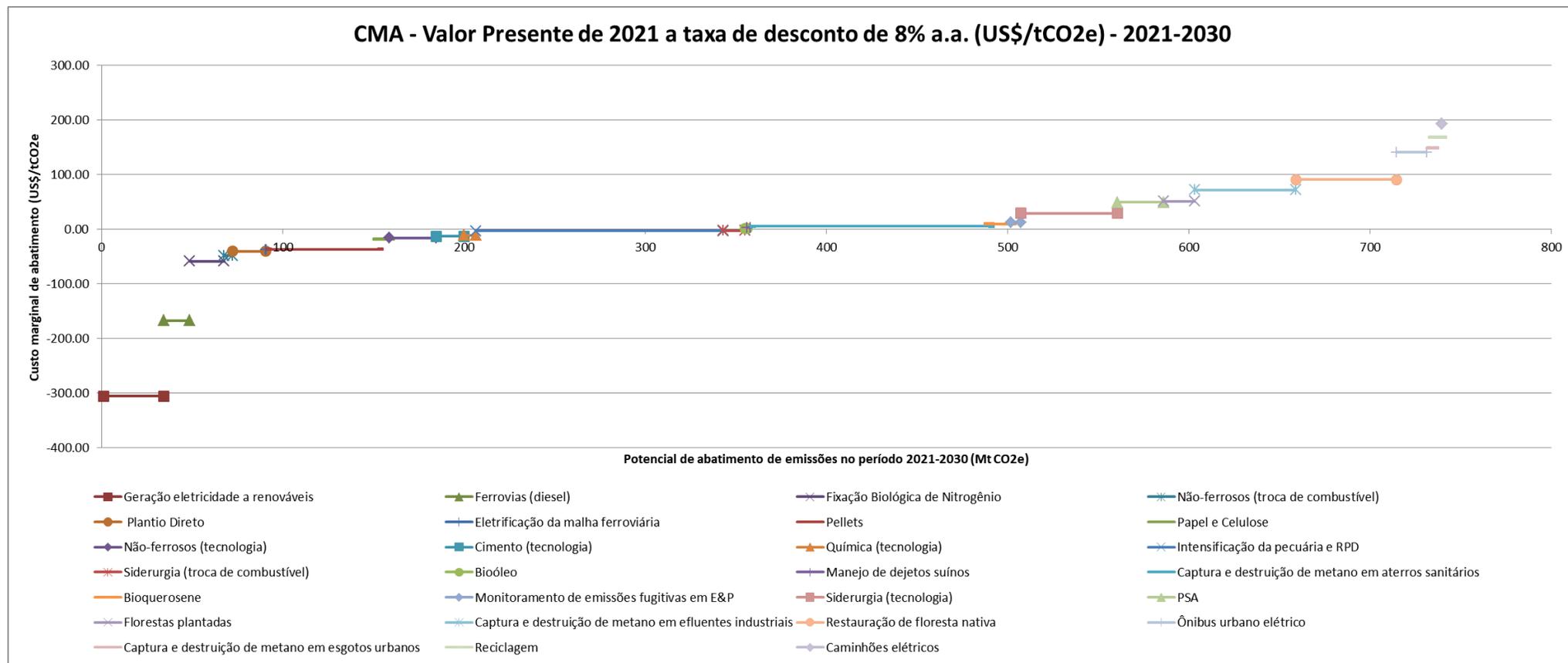
A seguir são apresentadas as curvas de custo marginal de abatimento (CMA) para as principais opções de mitigação contempladas no estudo. A CMA associa o custo de implementação de cada medida (eixo vertical) a seu potencial de abatimento de emissões total (eixo horizontal), permitindo comparar a atratividade de cada opção.

Considera-se que os esforços de mitigação têm início em 2021 e a curva de custo marginal de abatimento é calculada para dois períodos distintos: de 2021 a 2030, ano final da NDC brasileira, e de 2031 a 2050, o fim do horizonte de análise do estudo. Os valores são apresentados em dólares americanos de 2015, com fluxo de caixa descontado em 8% a.a., trazido para valor presente no ano de 2021 no primeiro período e 2031 no segundo. A apresentação em valores presentes é relevante, pois permite comparar investimentos em mitigação realizados em diferentes anos pertencentes ao mesmo período (ex: 2022 e 2029)<sup>1</sup>.

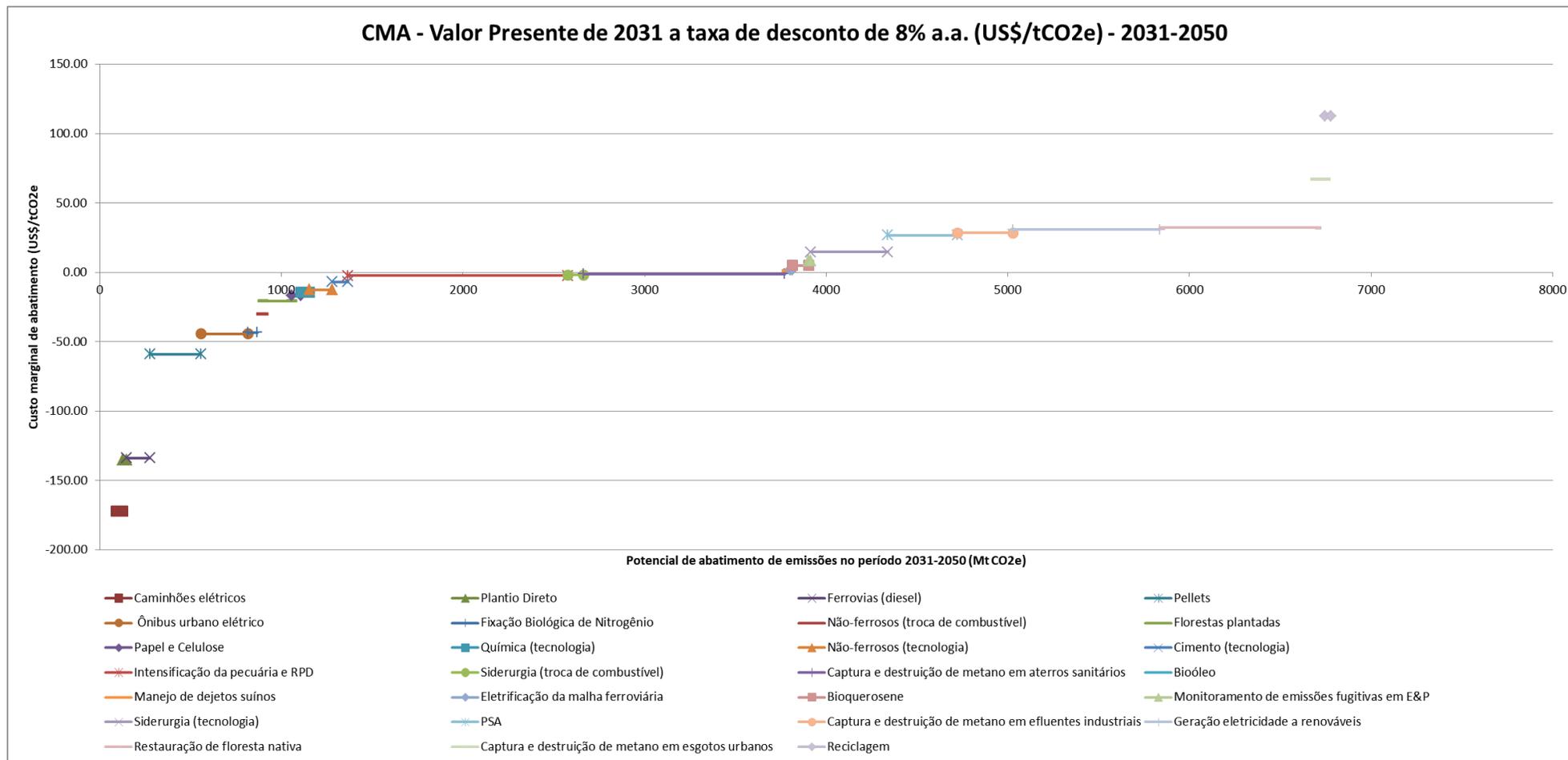
---

<sup>1</sup> Não foram incluídos nas Figuras 5 e 6 os custos marginais de abatimento da expansão do transporte ferroviário de passageiros (metrô e VLT), por se tratarem de valores muito altos, que prejudicariam a visualização das figuras. Pelo mesmo motivo, os custos referentes à expansão de veículos leves elétricos foram excluídos, por se tratarem de valores muito baixos (pois não contemplam os investimentos necessários à implantação da infraestrutura de recarga das baterias). Os valores correspondentes a tais medidas são:

- Transporte ferroviário de passageiros: VP: 2021-2030: 1592 US\$/tCO<sub>2</sub>e; 2031-2050: 1873 US\$/tCO<sub>2</sub>e
- Veículos leves elétricos: VP: 2021-2030: -1265 US\$/tCO<sub>2</sub>e; 2031-2050: -465 US\$/tCO<sub>2</sub>e



**Figura 5.** Curva de custo marginal de abatimento – Cenário 1,5°C – período 2021-2030 (US\$/tCO<sub>2</sub>e, em valores de 2021, à taxa de desconto de 8%aa)



**Figura 6.** Curva de custo marginal de abatimento – Cenário 1,5°C – período 2031-2050 (US\$/tCO<sub>2</sub>e, em valores de 2031, à taxa de desconto de 8%aa)

### 8.3 Análise de Sensibilidade dos Custos de Abatimento de Emissões

Os custos de abatimento apresentados na seção anterior consideram uma taxa de desconto de 8% a.a. e um valor de referência para o barril de petróleo internacional de US\$87<sup>2</sup>. Os custos médios de abatimento, ponderados pelo potencial de mitigação de cada medida, são 11,3 US\$/tCO<sub>2</sub>e no período 2021-2030 e -1,3 US\$/tCO<sub>2</sub>e no período 2031-2050, ambos a valor presente, como explicado anteriormente.

Foram conduzidas análises de sensibilidades para duas variáveis-chave da modelagem:

- a. considerando o valor de referência para o barril de petróleo internacional a US\$60<sup>3</sup>. Pode-se esperar preços mais baixos para combustíveis fósseis em cenários em que não apenas o Brasil, mas todos os principais países emissores promovem esforços globais de descarbonização, fruto do sucesso de negociações internacionais;
- b. considerando uma taxa de desconto de 4% a.a., consistente com a ótica social empregada nos objetivos de mitigação do exercício e com o alto grau de incerteza inerente a cenários de longo prazo.

Os custos de abatimento resultantes da análise de sensibilidade realizada são consolidados na Tabela 27a seguir, contrastados com valores do cenário original.

Tabela 27– Custos médios de abatimento (ponderados pelo potencial de mitigação de cada medida), para preços internacionais de petróleo de 87 e 60 US\$/barril e taxas de desconto de 8 e 4% a.a.

	Petróleo: 87 US\$/barril TD: 8% a.a. (Cenário original)	Petróleo: 87 US\$/barril TD: 4% a.a.	Petróleo: 60 US\$/barril TD: 8% a.a.	Petróleo: 60 US\$/barril TD: 4% a.a.
2021-2030	11,3	2,7	17,5	10,6
2031-2050	-1,3	-18,9	7,5	-5,6

<sup>2</sup>Dólares americanos de 2015. Baseado no preço estimado para o barril de petróleo do '450 Scenario' do relatório World Energy Outlook 2015 de IEA (2015).

<sup>3</sup> Baseado no preço estimado para o barril de petróleo do 'Low Oil Price Case' e 'Sustainable Development Scenario' do World Energy Outlook 2017 de IEA (2017).

## 9. Estimativa de Co-benefícios da Mitigação de Emissões de GEE no Setor Transporte

As ações de mitigação de emissões de GEE podem resultar em co-benefícios: “efeitos positivos que uma política ou medida visando um objetivo poderia ter em outros objetivos, independentemente do efeito líquido sobre o bem-estar social geral. Co-benefícios são frequentemente sujeitos a incerteza e dependem das circunstâncias locais e das práticas de implementação” (IPCC, 2013). Como por exemplo, podemos citar a abertura de mercados com maiores restrições ambientais, aumento da produtividade e redução de custos com insumos. Há, também, co-benefícios como a melhora da qualidade ambiental ou adaptação às mudanças climáticas. Nesse estudo, foram estimados alguns co-benefícios de saúde pela redução da poluição atmosférica devido à mitigação de GEE, no setor de transportes, do Cenário 1,5°C.

Tais co-benefícios foram estimados para nove regiões metropolitanas: Belém, Belo Horizonte, Curitiba, Fortaleza, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro, Salvador e São Paulo. Para estimar seu valor econômico, foram utilizadas técnicas de valoração de recursos ambientais. Os benefícios estimados se referem à melhora na qualidade do ar com a redução da emissão de material particulado inalável (MP<sub>10</sub>) resultante da substituição das frotas de veículos à combustão com motor a diesel (ônibus, caminhões e comerciais leves) por frotas elétricas. Foram feitas diversas hipóteses simplificadoras<sup>4</sup> para a elaboração do exercício descritas no relatório detalhado.

A redução na concentração de MP<sub>10</sub> diminui (1) casos de doenças no aparelho respiratório, (2) os dias de trabalho perdidos por conta dessas doenças e (3) as mortes com doenças respiratórias (Dockery et al., 1993; Saldiva et al., 1995). Estimou-se, inicialmente, a concentração de MP<sub>10</sub> para cada região metropolitana para o cenário de referência e para o cenário 1.5°C, calculando-se a diferença em função das tecnologias adotadas, *ceteris paribus* todas as outras variáveis. Para o cálculo dos custos hospitalares evitados e redução dos dias perdidos, foi utilizada a metodologia adotada pelo Banco Mundial por Lvovsky (2000), com funções dose-resposta listadas por Ostro (1994). Já a metodologia

---

<sup>4</sup> A adoção de uma série de hipóteses simplificadoras foi necessária. A primeira delas considera que a relação entre emissão de poluente MP<sub>10</sub> e concentração na atmosfera (qualidade do ar) se dá por correlação linear entre as variáveis emissão e concentração, ou seja, a concentração de MP<sub>10</sub> seria reduzida na mesma proporção que a emissão do poluente. Uma segunda hipótese é uma aproximação com o consumo de diesel supondo que a quantidade emitida por frota é proporcional ao diesel consumido (ignorando a eficiência específica de cada frota). Os dados de concentração foram retirados do relatório de qualidade do ar da CETESB, ano base 2015. Uma terceira consistiu na adoção da proporção de emissões de particulados por subcategoria da frota de acordo com o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, ano base 2012, do Ministério do Meio Ambiente.

para o cálculo da redução das perdas com a mortalidade por conta da poluição do ar, foi a Produção Sacrificada dos anos de vida perdidos utilizada por Seroa da Motta et al. (2000).

## Resultados

A Tabela 28 a seguir apresenta um resumo da concentração de MP10 por região metropolitana para o ano de 2015, para os cenários de referência e de mitigação (2050) e a diferença nas concentrações anuais entre os dois cenários ( $\Delta C$ ). As hipóteses e resultados detalhados estão no relatório completo.

Tabela 28. Valores das projeções da concentração anual média de MP10 nos cenários em estudo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Região Metropolitana	Situação atual (2015)	Cenário de Referência (2050)	Cenário de Mitigação (2050)	$\Delta C$
<b>São Paulo</b>	29	33,0	28,4	4,6
<b>Rio de Janeiro</b>	49	52,8	48,3	4,5
<b>Belo Horizonte</b>	53	47,3	44,1	3,2
<b>Salvador</b>	17	15,0	14,0	1,0
<b>Recife</b>	17	15,0	14,0	1,0
<b>Fortaleza</b>	17	15,0	14,0	1,0
<b>Belém</b>	17	15,0	14,0	1,0
<b>Curitiba</b>	22	19,5	18,1	1,4
<b>Porto Alegre</b>	22	19,8	18,5	1,3

O valor monetário total acumulado dos co-benefícios pela redução da morbidade e mortalidade por conta da redução das concentrações de MP<sub>10</sub> no período 2021-2030 ficou em 280 milhões de reais (em reais de 2015), o que corresponde a 7% dos investimentos adicionais em mitigação pela eletromobilidade (ônibus, caminhões e comerciais leves), no mesmo período. Já no período 2031-2050, o valor monetário total acumulado dos co-benefícios ficou em 16 bilhões de reais (em reais de 2015). Quando comparado com os 136 bilhões de reais (em reais de 2015) dos investimentos adicionais em mitigação pela eletromobilidade, os co-benefícios equivalem a 11% do investimento no mesmo período.

A análise feita neste exercício é simplificada, limitando-se aos co-benefícios da redução de (MP10) um dos diversos poluentes emitidos pelo diesel. Além disso, não foram incorporadas outras morbidades relacionadas à poluição, como neoplasias e doenças cardiovasculares. Os co-benefícios podem ser mais abrangentes quando incorporadas outras melhorias nos serviços ambientais oferecidos, como a redução da poluição sonora e co-benefícios sociais do aumento da eficiência energética da frota.

## 10. Referências

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade do ar no estado de São Paulo 2013. São Paulo, 2014.

DOCKERY, D. W. et

al. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. The New England Journal of Medicine, v. 329, n. 24, p. 1753-1759, 1993.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2016 – Nota Técnica DEA 13/14: Demanda de Energia 2050. Série Estudos da Demanda de Energia. Rio de Janeiro: MME/EPE

EPE, 2017a. Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2017, Rio de Janeiro.

EPE, 2017b. Plano Decenal de Energia 2026. Série Estudos da Demanda de Energia. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2016.

Gouvello, C.; Britaldo, S.S.F.; Nassar, A.; Schaeffer, R.; Alves, F.J.; Alves, J.W.S. 2010. Estudo de Baixo Carbono para o Brasil. Washington DC. Banco Mundial.

International Energy Agency (2015), World Energy Outlook 2015. Paris, 718pp.

International Energy Agency (2017), World Energy Outlook 2017. Paris, 782pp.

IPCC, 2013. Working Group II, Glossary.

Lvovsky, K.; Hughes, G.; Maddison, D.; Ostro, B.; Pearce, D. Environmental Costs of Fossil Fuels : A Rapid Assessment Method with Application to Six Cities. Environment Department papers;no. 78. Pollution Management series.. World Bank, Washington, DC. 2000.

<https://52.21.52.208/handle/10986/18303> License: CC BY 3.0 IGO.” Acesso em: out. 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2016) RenovaBio – Diretrizes Estratégicas. Proposta Submetida à consulta pública. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/web/guest/consultas-publicas?p\\_p\\_id=consultapublicaexterna\\_WAR\\_consultapublicaportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&consultapublicaexterna\\_WAR\\_consultapublicaportlet\\_consultaId=26&consultapublicaexterna\\_WAR\\_consultapublicaportlet\\_mvcPath=%2Fhtml%2Fpublico%2FdadosConsultaPublica.jsp](http://www.mme.gov.br/web/guest/consultas-publicas?p_p_id=consultapublicaexterna_WAR_consultapublicaportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&consultapublicaexterna_WAR_consultapublicaportlet_consultaId=26&consultapublicaexterna_WAR_consultapublicaportlet_mvcPath=%2Fhtml%2Fpublico%2FdadosConsultaPublica.jsp)

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS – MDIC (2017) Inovar auto – Sistema de acompanhamento. Disponível em: [http://inovarauto.mdic.gov.br/InovarAuto/public/login.jsp;jsessionid=NKRQhnVGfBq9ndfsJVs1NyNq83GhNfTgWmRlHkP7rVCmL212y2n9!1480882796?\\_adf.ctrl-state=ki7egzv3d\\_4](http://inovarauto.mdic.gov.br/InovarAuto/public/login.jsp;jsessionid=NKRQhnVGfBq9ndfsJVs1NyNq83GhNfTgWmRlHkP7rVCmL212y2n9!1480882796?_adf.ctrl-state=ki7egzv3d_4)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÃO, 2015. Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB. Secretaria Nacional de Saneamento.

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

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (2011). Plano Nacional de Logística e Transportes - Projeto de Reavaliação de estimativas e Metas do PNLT. Disponível em: < <http://www.transportes.gov.br/images/2014/11/PNLT/2011.pdf>>.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES E MINISTÉRIO DAS CIDADES (2013) Plano setorial de transporte e de mobilidade urbana para mitigação e adaptação à mudança do clima (PSTM). Disponível em: <http://bibspi.planejamento.gov.br/bitstream/handle/iditem/298/PSTM.pdf?sequence=1>

Ostro, B.. 1994. "Estimating the Health Effects of Air Pollution: A Methodology with Application to Jakarta." Policy Research Working Paper 1301. Policy Research Department, World Bank, Washington, D.C.

PLANO ABC, 2015. Observatório do Plano ABC. Invertendo o sinal de carbono da agropecuária brasileira. Uma estimativa do potencial de mitigação de tecnologias do Plano ABC de 2012 a 2023. RELATÓRIO 5 – ANO 2. JULHO 2015

Projeto IES-Brasil – 2050 (2017) - Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Emissão de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2050. Relatório completos disponíveis em [www.centroclima.coppe.ufrj.br](http://www.centroclima.coppe.ufrj.br).

SALDIVA, P. H. N. et al. Air pollution and mortality in elderly people: a time-series study in São Paulo, Brazil. Arch Environ Health, v. 50, n. 2, p. 159-163, 1995.

SEROA da MOTTA, ORTIZ, R., FREITAS, S. Health and economic values for mortality and morbidity cases associated with air pollution in Brazil. Ancillary benefits and costs of greenhouse gas mitigation. Paris: OECD/RFF, 2000.

UNEP, 2016. The Emissions Gap Report 2016. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Quênia. Ambiental. Brasília, DF, 2013.

## Anexo

