

# RELATÓRIO DE EXECUÇÃO DO OBJETO

## *P2.3 – NECESSIDADES E OPORTUNIDADES DE INVESTIMENTO – TRANSPORTE (PARTE 1)*

**Referência: INVESTMINAS/CT/25/2024**

Este relatório compõe o Produto 2.3 – Necessidades e Oportunidades de Investimento – Transporte (Parte 1), conforme previsto na Cláusula 6.a do Contrato INVESTMINAS/CT/25/2024. O objeto foi executado no período de janeiro a maio de 2025, incluindo revisões e ajustes entre junho e novembro de 2025. O referido produto será integralizado quando disponibilizada sua Parte 2.

# Rota para a descarbonização da economia de Minas Gerais através da promoção de investimentos privados

*Necessidades e Oportunidades de Investimento – Transporte (Parte 1)*



# Sumário

ACRÔNIMOS.....	7
INTRODUÇÃO.....	11
CONTEXTUALIZAÇÃO .....	12
ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	14
Cenário Base .....	15
Cenário <i>Net Zero</i> .....	17
Cenário Rota .....	18
Análise do potencial de mitigação.....	19
Análise financeira e MACC .....	20
METODOLOGIA APLICADA E RESULTADOS.....	24
Cenário Base .....	25
<i>Bottom-up</i> – rodoviário.....	25
<i>Top-down</i> – ferroviário e aéreo .....	31
Avaliação do Cenário Base.....	34
Cenário <i>Net Zero</i> .....	36
Plano de Descarbonização de Minas Gerais (PDMG).....	36
DDS (DDP <i>Initiative</i> ) .....	37
NGFS (GCAM).....	37
SBTi.....	38
Avaliação dos Cenários <i>Net Zero</i> .....	39
Cenário Rota .....	41
Tecnologias incluídas na MACC .....	41
Tecnologias não incluídas na MACC.....	43
Premissas e avaliação do Cenário Rota .....	47
Avaliação dos Cenários Base, <i>Net Zero</i> e Rota.....	59
CONCLUSÃO .....	61
CENÁRIOS CONSOLIDADOS .....	63
Cenário Base .....	63
Metodologia e premissas .....	63
Resultados.....	64
Cenário Rota .....	66



Metodologia e premissas .....	66
Resultados.....	66
Cenário Rota+ .....	71
Metodologia e premissas .....	71
Resultados.....	75
Emissões evitadas .....	90
Considerações finais .....	91
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>100</b>
Fichas Técnicas .....	100
Grupo 1 – Sistemas de propulsão alternativos.....	100
Grupo 2 – Troca da fonte de energia para combustíveis e biocombustíveis convencionais .....	107
Grupo 3 – Troca da fonte de energia para biocombustíveis avançados .....	110
Grupo 4 – Ampliação da infraestrutura de modos de alta capacidade.....	113



# Índice de figuras

Figura 1: Curvas ilustrativas dos Cenários Base, <i>Net Zero</i> e Rota.....	15
Figura 2: Fluxo lógico generalista da metodologia bottom-up .....	16
Figura 3: Fluxo lógico generalista da metodologia top-down.....	16
Figura 4: Exemplo de análise visual das emissões mitigadas por tecnologia.....	20
Figura 5: Exemplo de MACC .....	22
Figura 6: Representatividade dos modais nas emissões do setor de transporte .....	24
Figura 7: Metodologia bottom-up para o modal rodoviário – estruturação do histórico.....	26
Figura 8: Metodologia bottom-up para o modal rodoviário – projeções .....	26
Figura 9: Metodologia top-down – ferroviário .....	32
Figura 10: Metodologia top-down – aéreo.....	32
Figura 11: Evolução das emissões de GEE no Cenário Base por combustível .....	35
Figura 12: Evolução das emissões de GEE no Cenário Base por modal .....	35
Figura 13: Trajetória de emissões nos cenários avaliados em relação ao ano-base .....	40
Figura 14: Trajetória de emissões nos cenários avaliados .....	41
Figura 15: Resultado da avaliação das tecnologias .....	42
Figura 16: Resultados da MACC do setor de transporte .....	53
Figura 17: Estimativa das emissões para o fim do horizonte no Cenário Rota.....	58
Figura 18: Trajetória de emissões do Cenário Rota e dos cenários avaliados no produto 2.2 .....	59
Figura 19: Emissões por setor – Cenário Base .....	64
Figura 20: Emissões totais – Cenários Base e Rota .....	68
Figura 21: Curva MAC – Cenário Rota .....	69
Figura 22: Comparação das emissões por cenário e setor .....	76
Figura 23: Emissões totais por cenário .....	77
Figura 24: Curva MAC – Cenário Rota+ .....	78
Figura 25: Emissões evitadas: geração de eletricidade renovável e produção de hidrogênio verde .....	90



## Índice de tabelas

Tabela 1: Funções de sucateamento e parâmetros.....	27
Tabela 2: Função de sucateamento para motocicletas.....	28
Tabela 3: Estimativa da frota das locadoras.....	29
Tabela 4: Variáveis de projeção .....	30
Tabela 5: Projeção de consumo de combustível no modal rodoviário ( $10^3$ m <sup>3</sup> ).....	31
Tabela 6: Projeção de emissões do modal rodoviário ( $10^3$ tCO <sub>2</sub> e) .....	31
Tabela 7: Variáveis de projeção .....	33
Tabela 8: Projeção de consumo de combustível no modal ferroviário e no modal aéreo ( $10^3$ m <sup>3</sup> ).....	34
Tabela 9: Emissões do modal ferroviário e no modal aéreo (ktCO <sub>2</sub> e).....	34
Tabela 10: Cenário PDMG .....	37
Tabela 11: Cenário DDS – (DDP Initiative).....	37
Tabela 12: Cenário NGFS.....	38
Tabela 13: Cenário SBTi .....	39
Tabela 14: Síntese das premissas e dos resultados da MACC – setor de transporte .....	50
Tabela 15: Comparação das tecnologias – Cenário Rota e Cenário Rota+ .....	81

## Índice de quadros

Quadro 1: Características dos Cenários Net Zero.....	39
--	----



# ACRÔNIMOS

ABRACICLO – Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares

AFOLU – Agropecuária, Floresta e Outros Usos da Terra

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários

ANTT – Agência Nacional de Transporte Terrestre

BAU – *Business as Usual* (Cenário Tendencial)

BECCS – *Bioenergy with Carbon Capture and Storage* (Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono)

BEV – *Battery Electric Vehicle* (veículos elétricos a bateria)

CAPEX – *Capital Expenditure* (despesas de capitais)

CCS – *Carbon Capture and Storage* (captura e armazenamento de carbono)

CDP – *Carbon Disclosure Project*

CHAMP – *Coalition for High Ambition Multi-level Partnerships* (Coalizão para Parcerias Multinível de Alta Ambição para a Ação Climática)

CEBDS – Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável

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

DDP – *Deep Decarbonization Pathways* (Caminhos de Descarbonização Profunda)

DDS – *Deep Decarbonization Scenario* (Cenário de Descarbonização Profunda)

EFC – Estrada de Ferro Carajás

EFVM – Estrada de Ferro Vitória a Minas

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FCA – Ferrovia Centro Atlântica



FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicle* (veículos elétricos a célula de combustível)

FGV – Fundação Getúlio Vargas

FIOL – Ferrovia de Integração Oeste-Leste

FJP – Fundação João Pinheiro

GCAM – *Global Change Assessment Model* (Modelo de Avaliação de Mudança Global)

GEE – gases de efeito estufa

GNV – gás natural veicular

HEV – *Hybrid Electric Vehicles* (Veículos elétricos híbridos)

HVO – *Hydrotreated Vegetable Oil* (óleo vegetal hidrotratado)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBTS – Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável

IEA – *International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)

IMACLIM – *Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect* (Modelo Integrado para Avaliar o Efeito Estufa)

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

LCAS – *Local Climate Action Summit* (Cúpula da Ação Climática Local)

LULUCF – *Land Use, Land-Use Change and Forestry* (Uso da terra, mudança de uso da terra e florestas)

MACC – *Marginal Abatement Cost Curve* (Curva de Custo Marginal de Abatimento)

MCDI – Ministério das Cidades

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MME – Ministério de Minas e Energia

MS-SOFC – *Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cells* (células de combustível de óxido sólido suportadas por metal)

MTR – Ministério dos Transportes



NDC – *Nationally Determined Contribution* (Contribuição Nacionalmente Determinada)

NGFS – *Network for Greening the Financial System*

OPEX - *Operational Expenditure* (despesas operacionais)

PBEV – Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

PDMG – Plano de Descarbonização de Minas Gerais

PIB – Produto Interno Bruto

P-KM – Passageiro-Quilômetro

PLAC-MG – Plano de Ação Climática de Minas Gerais

PNMC – Política Nacional sobre Mudança do Clima

REGAP – Refinaria Gabriel Passos

RMC – *Rail Management Corporation* (Corporação de Gestão Ferroviária)

SAF – *Sustainable Aviation Fuel* (combustível sustentável de aviação)

SBTi – *Science Based Targets Initiative* (Iniciativa de Metas Baseadas na Ciência)

SDA – *Setorial Decarbonization Approach* (abordagem de descarbonização setorial)

SOFC – *Solid Oxide Fuel Cell* (célula de combustível de óxido sólido)

TCFD – *Task Force on Climate-Related Financial Disclosures* (Força-Tarefa sobre Divulgações Financeiras Relacionadas ao Clima)

TCO – *Total Cost of Ownership* (custo total de propriedade)

T-KM – Tonelada-Quilômetro

TKU – Tonelada Quilômetro Útil

TTW – *tank-to-wheel* (do tanque à roda)

TUC – transporte urbano de carga

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UK – *United Kingdom* (Reino Unido)



UNEP – *United Nations Environment Programme* (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente)

USP – Universidade de São Paulo

VPL – valor presente líquido

WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*

WRI – *World Resources Institute*

WWF – *World Wide Fund for Nature*



# INTRODUÇÃO

Este documento tem como objetivo apresentar os cenários de descarbonização para o setor de transporte do estado de Minas Gerais, mapear e priorizar as principais soluções tecnológicas aplicáveis ao setor por meio da elaboração da Curva de Custo Marginal de Abatimento (MACC, na sigla em inglês). Essa análise integra o *roadmap* setorial em construção no âmbito do projeto Rota. Para cumprir esse propósito, o conteúdo está estruturado em cinco seções:

**Seção 1:** traz uma breve contextualização do projeto Rota;

**Seção 2:** descreve a metodologia utilizada para a definição do Cenário Base, Cenário *Net Zero* e Cenário Rota;

**Seção 3:** detalha as premissas e modelagens utilizadas para o cálculo das emissões dos modais rodoviário, ferroviário e aéreo no Cenário Base, estruturado em subseções. Em seguida, são detalhadas as abordagens adotadas na construção do Cenário *Net Zero*, também estruturado em subseções. Por fim, o Cenário Rota apresenta uma análise dos custos de implementação e potencial de mitigação para diversas tecnologias para o setor de transporte, incluindo representações gráficas comparativas em relação ao Cenário Base e a outros cenários climáticos analisados;

**Seção 4:** destaca os principais resultados dos Cenários Base, *Net Zero* e Rota de forma comparativa;

**Seção 5:** apresenta uma visão consolidada dos resultados dos quatro setores analisados no âmbito do projeto Rota, Transporte, Energia, Indústria e Agropecuária, Florestas e Outros Usos da Terra (AFOLU), destacando os principais desafios e oportunidades que o estado poderá enfrentar para alcançar as metas assumidas no compromisso *Race to Zero*.

**ANEXO:** fichas das tecnologias.



# CONTEXTUALIZAÇÃO

O projeto Rota busca definir um *roadmap*, ou roteiro estratégico, a ser seguido para que os investimentos privados necessários para descarbonizar a economia de Minas Gerais possam ser identificados e viabilizados. O *roadmap* se desdobra em quatro macrossetores: AFOLU; Energia; Indústria e Transporte. Suas etapas incluem:

- elaboração de diagnósticos setoriais;
- construção de cenários de descarbonização;
- mapeamento e priorização das principais soluções tecnológicas, por meio da construção da MACC;
- identificação de necessidades e oportunidades de investimento;
- construção de propostas de implementação ou revisão de políticas públicas.

A primeira etapa constituiu a elaboração de diagnóstico dos quatro setores do projeto, trazendo uma contextualização das emissões do setor, um *benchmarking* de tecnologias incluídas em planos de descarbonização de estados brasileiros, incluindo o de Minas Gerais, além da identificação de potenciais soluções e barreiras para a redução de emissões em cada setor, a partir das tecnologias identificadas.

Na presente etapa, o *roadmap* avança para a análise de cenários de descarbonização, avaliando as projeções de emissões de gases de efeito estufa (GEE) nos quatro setores considerados. Inicialmente, será adotado um cenário *Business as Usual* (BAU), que pressupõe a ausência de novas tecnologias e um crescimento econômico projetado (Cenário Base). Em seguida, os resultados foram comparados com diferentes cenários de neutralidade climática modelados pela literatura especializada, permitindo medir o esforço necessário para alinhar o estado a uma trajetória *Net Zero* (Cenários *Net Zero*). Além disso, esses cenários serviram de subsídio para a construção da MACC, ou curva MAC, permitindo avaliar as tecnologias de baixo carbono em termos de seu potencial de redução de emissões e dos custos a elas associados, o que, por sua vez, permite estimar a contribuição dessas tecnologias para o atingimento das metas de descarbonização (parte 1 desta etapa do projeto). Assim, a elaboração da MACC permitiu a construção do Cenário Rota, que representa os esforços necessários, em termos de tecnologias de mitigação, para deslocar a curva de emissões do Cenário Base até o atingimento das metas apresentadas nos cenários *Net Zero*.

Na fase seguinte desta etapa, será elaborado um documento específico voltado à estruturação de um portfólio de investimentos estratégicos para a implementação do *roadmap* de descarbonização dos setores do projeto (parte 2). Isso incluirá o mapeamento do panorama de investimentos, a avaliação da aderência às curvas MAC, a consolidação de custos e a identificação da demanda de investimentos, garantindo uma base técnica e financeira robusta para direcionar recursos a tecnologias de baixo carbono em Minas Gerais.



Por fim, a última etapa focará a elaboração de um documento técnico, com propostas de aperfeiçoamento de políticas públicas relativas aos setores do projeto Rota, visando facilitar e fomentar a implementação das tecnologias identificadas nas etapas anteriores do projeto, por meio de um ambiente normativo e regulatório mais favorável à atração de investimentos privados necessários ao cumprimento das metas de descarbonização do estado.



# ABORDAGEM METODOLÓGICA

A construção de cenários envolve a adoção de premissas e tem o objetivo de delinear de maneira consistente e plausível um estado futuro, com o propósito de orientar ações no presente (IPCC, s.d.). Nesse sentido, uma premissa que baliza o desenvolvimento dos cenários é a de que a produção de bens e serviços do estado de Minas Gerais deverá aumentar ao longo dos anos. Diante disso, a elaboração de dados de projeção torna-se essencial para garantir a coerência dos cenários e direcionar os esforços rumo à neutralidade das emissões líquidas de GEE até 2050, subsidiando o planejamento de ações de mitigação por meio da adoção de tecnologias ou métodos de remoção de emissões de GEE.

Nesse contexto, os cenários climáticos passam a ter um papel estratégico ao fornecerem base analítica para que organizações possam avaliar não apenas seu impacto sobre as emissões, mas também os efeitos das mudanças climáticas sobre suas operações. Tais cenários evidenciam a necessidade de adoção de tecnologias para redução de emissões a fim de alcançar metas estabelecidas e contribuem para a definição do nível de ambição mais adequado ao portfólio de projetos. Para isso, é possível utilizar diferentes modelos de referência, conforme as características e o grau de detalhamento dos dados de emissões e das especificidades de cada setor (TCFD, 2017).

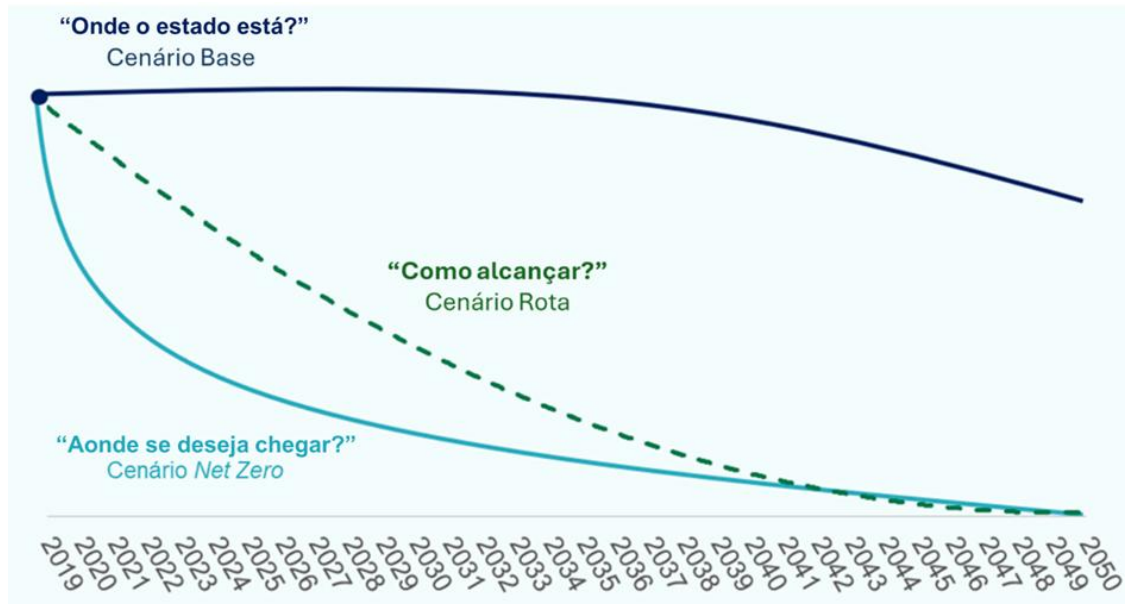
Dessa forma, a construção de cenários de descarbonização constitui uma das principais etapas para o desenvolvimento de planos de descarbonização. Para o projeto Rota, são utilizados três cenários em conjunto, representados na Figura 1.

- i) **Cenário Base:** reflete a continuidade dos compromissos de descarbonização já assumidos e o panorama tecnológico atual de cada setor avaliado, pressupondo a ausência de introdução de novas tecnologias e o crescimento econômico previsto. Desse modo, o Cenário Base representa a situação BAU.
- ii) **Cenário Net Zero:** são cenários referenciais, calculados por instituições reconhecidas e que apresentam caminhos possíveis para a descarbonização. Esses cenários podem ou não ter desagregação setorial ou territorial, além de representarem as informações das tecnologias do ano em que foram modelados (como custos, disponibilidade, tipos, entre outras). Dessa forma, são importantes balizadores do caminho ao qual se deseja chegar, auxiliando na avaliação, por exemplo, do nível de ambição da implementação de tecnologias de descarbonização.
- iii) **Cenário de descarbonização:** determinado a partir da análise dos esforços necessários, em termos de tecnologias de mitigação, para o atingimento do *Net Zero* no contexto do plano de descarbonização em questão. Em outras palavras, representa a hipótese do “como alcançar” a neutralidade de emissões, podendo ser considerado um Cenário *Net Zero* específico do plano. No caso do projeto Rota da Descarbonização, tal cenário é o **Cenário Rota**, que considera o contexto atual,



as tecnologias disponíveis e as características setoriais do estado de Minas Gerais.

Figura 1: Curvas ilustrativas dos Cenários Base, *Net Zero* e Rota



Fonte: Elaboração própria.

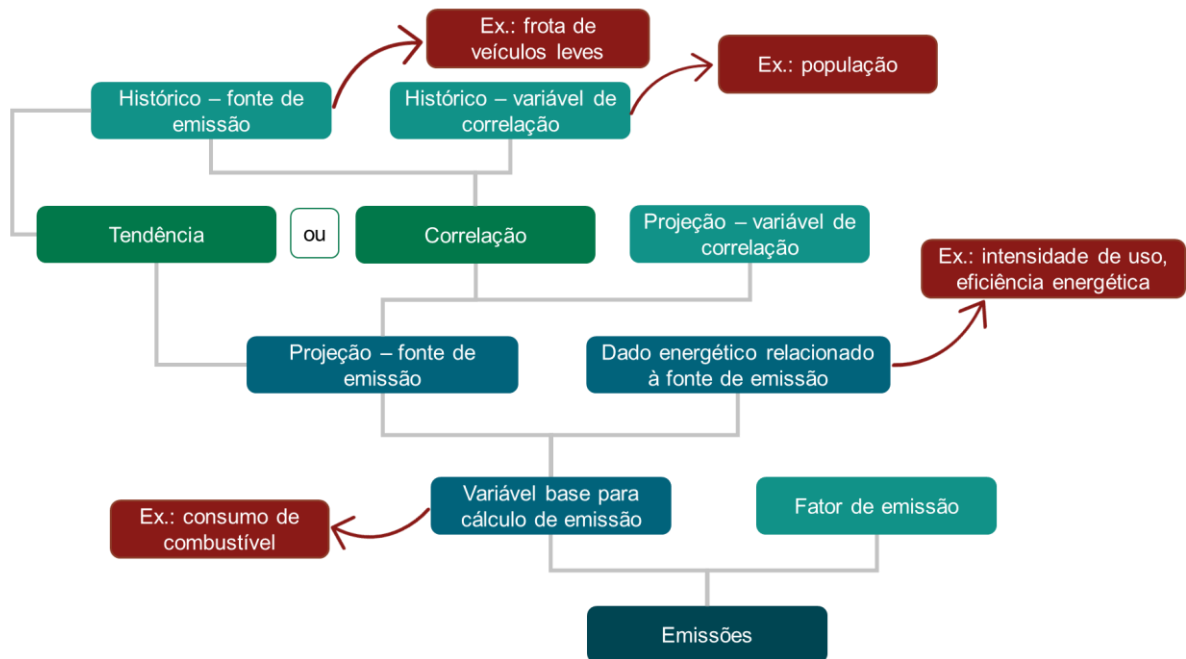
A seguir serão apresentadas as metodologias utilizadas para definir os Cenários Base, *Net Zero* e Rota.

## Cenário Base

A elaboração do Cenário Base dos quatro setores baseou-se nas metodologias *bottom-up* e *top-down* ou na combinação de ambas.

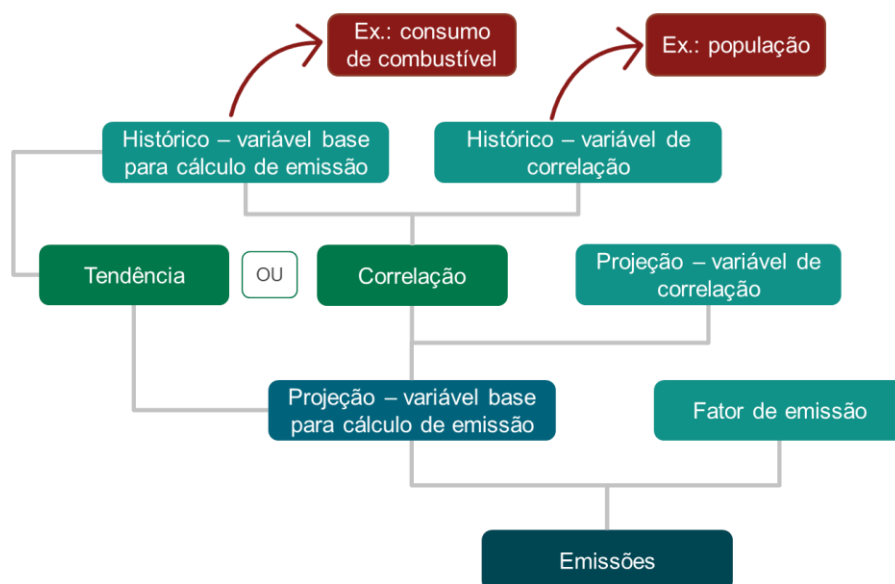
Segundo GRUBB *et al.* (1993), a metodologia *bottom-up* (Figura 2) apresenta um nível de detalhamento maior, partindo das tecnologias vigentes para estimar as emissões. Em vez de considerar apenas certos indicadores (macroeconômicos, demográficos e de outros tipos) essa modelagem se baseia em dados específicos da fonte emissora, como a frota de veículos leves. A projeção dessa fonte de emissão pode ser feita com base em tendências históricas ou correlações com outras variáveis, como a população. Além disso, incorporam-se dados energéticos associados à fonte, como quilometragem percorrida, eficiência energética e intensidade de uso. Esses dados permitem transformar a fonte emissora em uma variável energética, que, por sua vez, é usada no cálculo das emissões finais.



Figura 2: Fluxo lógico generalista da metodologia *bottom-up*

Fonte: Elaboração própria.

A metodologia *top-down* (Figura 3) estima as emissões com base em indicadores macroeconômicos, como Produto Interno Bruto (PIB), em indicadores demográficos, como população, e em indicadores mais abrangentes, como consumo total de energia. Essa metodologia analisa tendências históricas ou correlações entre variáveis, como mudanças econômicas que influenciam a demanda por combustíveis e a adoção de tecnologias mais limpas, sem, no entanto, detalhar em um nível tecnológico específico.

Figura 3: Fluxo lógico generalista da metodologia *top-down*

Fonte: Elaboração própria.



No setor de transporte, foram utilizadas a metodologia *bottom-up* para o modal rodoviário e a metodologia *top-down* para os modais aéreo e ferroviário. Combinando essas abordagens, foi possível construir cenários mais robustos, considerando tanto as projeções macroeconômicas dos indicadores selecionados quanto as especificidades tecnológicas de cada setor, que serão detalhadas na próxima seção

## Cenário Net Zero

O Cenário *Net Zero*, que orientará os esforços do estado de Minas Gerais para a redução das emissões, é baseado em diferentes abordagens presentes na literatura, com trajetórias alinhadas às Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs, na sigla em inglês) e aos cenários climáticos. Para o setor de transporte, foram avaliados quatro cenários:

**Net Zero do Plano de Descarbonização de Minas Gerais (PDMG)** – esse cenário foi desenvolvido especificamente para atender às necessidades e características do estado de Minas Gerais. No PDMG há uma integração dos modelos econômico e tecnológico por meio da abordagem setorial em que todos os setores contribuem para a redução de emissões de forma otimizada, com diversas tecnologias sendo aplicadas. Isto é, o modelo entrega o cenário com melhor custo-efetividade. De forma geral, a redução significativa das emissões no setor de transporte ocorre devido à substituição de 50% da demanda de gasolina e diesel fósseis por biocombustíveis equivalentes. Além disso, no caso do querosene de aviação, prevê-se sua substituição total por bioquerosene até 2050. No entanto, ainda restarão emissões residuais no setor de transporte nesse período, exigindo a implementação de remoções de carbono em outros setores, como o reflorestamento ou a captura de CO<sub>2</sub> associada à bioenergia (BECCS), para alcançar o *Net Zero*.

**Cenário de Descarbonização Profunda (DDS, na sigla em inglês) da Deep Decarbonization Pathways Initiative (DDP Initiative)** – essa metodologia foi utilizada para analisar cenários integrados de redução de emissões, considerando tanto a escala setorial quanto a nacional. O Cenário DDS integra o IMACLIM, um modelo matemático, econômico e climático originalmente desenvolvido como um modelo global, que, ao longo do tempo, passou a ser aplicado na avaliação de diversas economias nacionais, incluindo França, Brasil, China, Índia e África do Sul (CENTRO CLIMA; COPPE; UFRJ, 2024). Estima-se que no Cenário DDS, para o setor de transporte, o *Net Zero* é atingido em 2050, considerando a incorporação de tecnologias de remoção e captura de carbono resultantes das emissões negativas nos setores de energia e AFOLU.

**Network for Greening the Financial System (NGFS)** – essa metodologia adota uma abordagem setorial e nacional para a redução de emissões, combinando políticas e estratégias econômicas, assim como o DDP. O Cenário *Net Zero* 2050 do NGFS é uma abordagem ambiciosa que visa limitar o aquecimento global a 1,5 °C por meio da implementação de políticas climáticas e inovações tecnológicas, alcançando emissões líquidas zero de GEE até 2050. Para atingir essa meta, é fundamental a adoção imediata de



políticas climáticas robustas. Adicionalmente, os mecanismos de remoção de carbono<sup>1</sup> poderão ser usados para acelerar a descarbonização, porém deverão ser mantidos no mínimo possível, pois existem riscos, como a indisponibilidade da tecnologia de captura nos próximos anos, o que torna necessário manter a adoção desses mecanismos amplamente alinhada com a produção de bioenergia e com captura e armazenamento de carbono (BECCS) (NGFS, 2022).

**Science Based Targets initiative (SBTi)** – esse cenário foi estimado com base nas diretrizes da SBTi, uma iniciativa conjunta do *Carbon Disclosure Project* (CDP), do Pacto Global das Nações Unidas, do *World Resources Institute* (WRI) e do *World Wide Fund for Nature* (WWF). A SBTi apresenta diretrizes para que as organizações estabeleçam metas de redução de emissões baseadas na ciência, alinhadas com os objetivos do Acordo de Paris, que buscam limitar o aquecimento global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. A SBTi oferece suporte a três métodos de quantificação, sendo dois deles aplicados neste projeto:

- **contração absoluta:** refere-se à aplicação de uma taxa fixa de redução absoluta das emissões totais de gases de efeito estufa, em relação ao ano-base para todas as empresas, independentemente do setor. O percentual de redução definido pela SBTi para metas de longo prazo (2040-2050) é de 90% em relação ao ano-base.
- **abordagem de descarbonização setorial** (SDA, na sigla em inglês): considera ambições específicas para determinados setores ou subsetores. As metodologias são elaboradas considerando o contexto de cada um e buscando estabelecer metas que sejam ao mesmo tempo alcançáveis e ambiciosas.

## Cenário Rota

A identificação do Cenário Rota será apoiada pela MACC, que indicará os esforços necessários, em termos de tecnologias de mitigação, para reduzir a curva de emissões do Cenário Base até alcançar as metas estabelecidas nos Cenários *Net Zero*. Para o desenvolvimento da MACC, foram consideradas as mesmas premissas de crescimento utilizadas na construção do Cenário Base, garantindo coerência entre os cenários.

A MACC é uma ferramenta utilizada para avaliar o custo-benefício de diferentes tecnologias ou soluções de descarbonização, a partir do desenvolvimento de trajetória de emissões setoriais com o levantamento de soluções e construção de diagnóstico do inventário setorial. Esse processo envolve a elaboração de cenários futuros de emissões e o mapeamento das

---

<sup>1</sup> Os mecanismos destacados pelo NGFS referem-se à remoção tecnológica de carbono (technological carbon removal – TCRs), como a captura e o armazenamento de carbono. O uso dessas tecnologias em níveis reduzidos parte da premissa de que sua adoção indiscriminada poderia desencorajar rotas cruciais de descarbonização, como a transição para matrizes energéticas renováveis. Nesse cenário, a queima de combustíveis fósseis poderia ser mantida nos níveis atuais, com suas emissões sendo compensadas por meio dessas tecnologias, resultando em um balanço líquido de emissões igual a zero. No entanto, o uso de captura e armazenamento de carbono (CCS) é incentivado quando combinado à produção de bioenergia (BECCS), pois envolve a remoção de CO<sub>2</sub> de origem biológica, contribuindo para um balanço negativo de emissões – ou seja, remoções líquidas de carbono da atmosfera.



estimativas de redução de emissões e dos custos associados (ANTAQ, 2023). Dessa forma, a ferramenta permite visualizar o custo por tonelada de carbono equivalente evitada e a quantidade de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) que um projeto será capaz de mitigar (WAYCARBON, 2022). As próximas subseções detalham os aspectos ambientais (análise do potencial de mitigação) e econômicos (análise financeira), fundamentais para aplicação da MACC.

## Análise do potencial de mitigação

Para analisar o potencial de mitigação associado às tecnologias de descarbonização no contexto atual de Minas Gerais, é elaborado o chamado Cenário Rota. Esse cenário considera as tecnologias já disponíveis no mercado e as especificidades dos setores econômicos do estado de Minas Gerais, sendo posteriormente comparado ao Cenário Base.

Enquanto o Cenário Base projeta a evolução das emissões do setor de transporte de Minas Gerais com base em tendências históricas e políticas existentes (BAU), o Cenário Rota utiliza como base a trajetória projetada no Cenário Base e incorpora os impactos esperados da adoção das tecnologias de descarbonização analisadas. Dessa forma, o Cenário Base atua como a linha de base para mensurar o impacto de cada medida, e o Cenário Rota representa a nova trajetória de emissões resultante da aplicação dos potenciais de mitigação sobre essa linha de base.

A construção do Cenário Rota se dá por meio de um processo sequencial ou cumulativo de ajuste anual das emissões projetadas no Cenário Base até 2050. Para cada ano, calcula-se a redução de emissões esperada com a aplicação de cada tecnologia, levando em conta suas taxas de penetração e potenciais individuais, previamente analisados. Essas reduções são então subtraídas das emissões correspondentes do Cenário Base, resultando em uma trajetória anual de emissões líquidas que define o Cenário Rota. Assim, a diferença de emissões dos dois cenários, em qualquer ponto no tempo, representa o total de mitigação acumulada proporcionado pelas tecnologias implementadas até aquele ano, conforme visualizado na Figura 4.

Para cada uma das tecnologias avaliadas, foram analisados o ano de aplicação, a taxa de implementação ao longo do horizonte temporal e os impactos ambientais (Mitigação de CO<sub>2</sub>e) e econômicos (*Capital Expenditure* - CAPEX e *Operational Expenditure* - OPEX) esperados com sua implementação. Além disso, devido à complexidade da análise, conforme a natureza da tecnologia, foram incorporados dados complementares provenientes da literatura.

Nesse contexto, para a definição do Cenário Rota, assim como para a elaboração do Cenário Base, que representa a situação BAU, é fundamental identificar padrões históricos entre as fontes de emissão e o crescimento de determinadas variáveis como Produto Interno Bruto (PIB) ou população. Esses padrões são utilizados como premissas para a avaliação de cenários futuros no horizonte temporal analisado, cujas estimativas têm início em 2025 e se estendem até 2050, ano estabelecido como meta para o cumprimento do compromisso *Race*

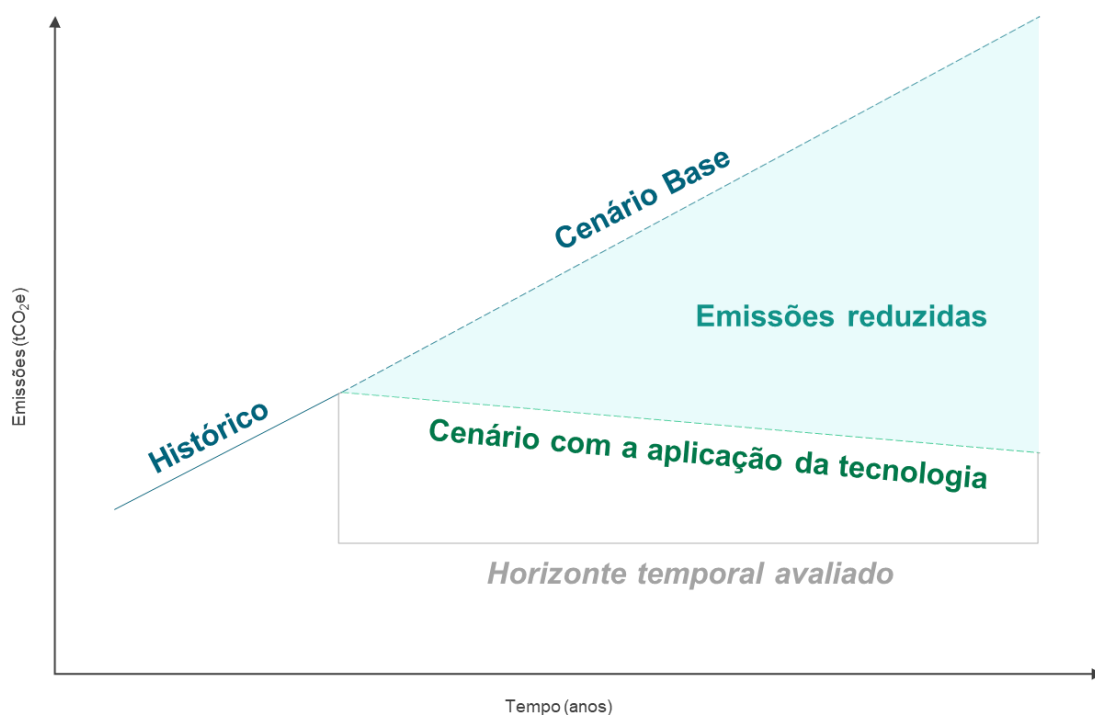


to Zero. Uma vez que o Cenário Rota deriva do Cenário Base, a solidez da projeção deste último, enraizada nos dados históricos, é crucial para a validade da análise.

Sob essa ótica, os dados históricos são importantes para trazer um panorama do setor de transporte de Minas Gerais, servindo de base para a projeção de emissões de acordo com a realidade estadual. A frota veicular, as operações ferroviárias, os movimentos aéreos e o uso de diferentes combustíveis são fatores que influenciam as emissões de transporte, indicando a complexidade do desafio enfrentado pelo estado para a descarbonização do setor.

Adicionalmente, as emissões de uma tecnologia são determinadas em função do impacto da alteração das emissões dos parâmetros associados à tecnologia, levando em consideração a projeção considerada na atividade da linha de base e nos parâmetros relacionados, como o consumo de combustível e de eletricidade em diferentes modais de transporte.

Figura 4: Exemplo de análise visual das emissões mitigadas por tecnologia



Fonte: Elaboração própria com base WBCSD (2023).

## Análise financeira e MACC

A integração entre a projeção de emissões e a análise da viabilidade financeira das tecnologias de mitigação representa um grande aliado no estabelecimento de uma estratégia climática. Essa abordagem possibilita visualizar, de modo prático, o custo por tonelada de CO<sub>2</sub>e evitado, ou seja, o custo marginal de abatimento decorrente da implementação das referidas tecnologias. Uma solução tecnológica pode apresentar um custo marginal de abatimento negativo, o que significa que sua implementação tem o potencial de gerar algum ganho financeiro, seja por meio de redução de custo, seja por geração de receita adicional.



De modo análogo, o custo marginal de abatimento positivo evidencia opções que exigem uma abdicação do ganho financeiro.

O custo marginal de abatimento de uma tecnologia é obtido a partir do cálculo do valor presente líquido (VPL). O VPL é um indicador financeiro que representa a soma dos fluxos de caixa futuros, positivos e negativos, trazidos a valor presente por meio de uma taxa de desconto anual (ARNABOLDI *et al.*, 2015; WORLD BANK, 2021).

No contexto da MACC, considera-se o inverso aditivo do VPL como numerador e o potencial de mitigação de emissão de GEE da tecnologia como denominador para calcular o custo marginal de abatimento, conforme ilustrado na equação 1 a seguir.

$$MAC = \frac{-VPL}{\text{Redução de GEE}}$$

Na qual:

**VPL:** valor presente líquido, expresso em R\$;

**Redução GEE:** potencial de mitigação, expresso em tCO<sub>2</sub>e.

Assim, para avaliar financeiramente cada tecnologia de abatimento, é construído um fluxo de caixa incremental específico. Esse fluxo de caixa representa a diferença nos custos e receitas ao longo do tempo entre implementar a nova tecnologia (Cenário Rota) ou manter a tecnologia atual (Cenário Base). Esse fluxo considera tanto os custos de investimento (CAPEX) quanto os custos de operação e de manutenção (OPEX) associadas à nova tecnologia em comparação com o Cenário Base.

O CAPEX refere-se aos investimentos iniciais ou periódicos necessários para adquirir e instalar a nova tecnologia (por exemplo, compra de maquinário), subtraindo-se qualquer CAPEX que seria necessário na linha de base no mesmo período, considerado como “investimento evitado”.

Por outro lado, o OPEX abrange os custos recorrentes de operação e manutenção da nova tecnologia (por exemplo, consumo de combustível, eletricidade, mão de obra, peças de reposição), comparados aos custos operacionais do Cenário Base.

Em complemento ao CAPEX e ao OPEX, a análise da MACC também considera as receitas financeiras que podem ser geradas pela implementação das tecnologias de descarbonização. Tais receitas representam entradas monetárias ao longo do horizonte de estudo, frequentemente resultantes da venda ou reaproveitamento de ativos de uso atual (Cenário Base) que se tornam obsoletos ou são substituídos pela nova tecnologia proposta no Cenário Rota. Um exemplo é a receita obtida com a venda de maquinário antigo ou equipamentos desativados. No cálculo da MACC, essas receitas atuam como uma redução do custo líquido da medida de mitigação, impactando positivamente sua viabilidade econômica e o custo marginal de abatimento.

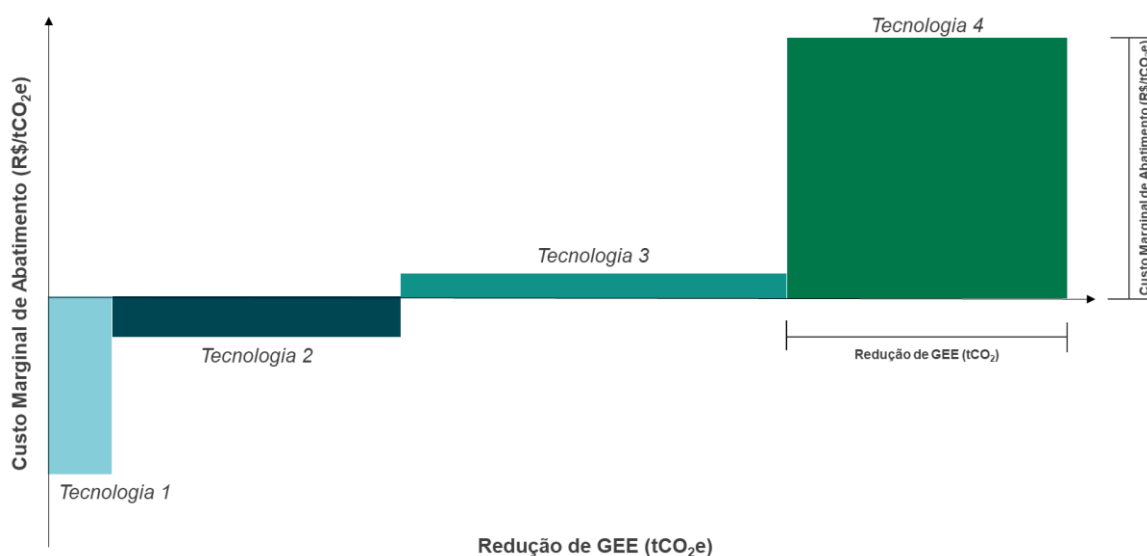


A análise do fluxo de caixa incremental ao longo do horizonte 2026-2050 permite identificar a viabilidade econômica da tecnologia. Em alguns casos, a tecnologia proposta pode levar a uma redução significativa no OPEX (como menor consumo de combustível) que, ao longo do tempo, supera um eventual aumento no CAPEX inicial. Nesses cenários, o fluxo de caixa incremental torna-se positivo, indicando uma economia líquida em relação à linha de base.

Em resumo, a partir do fluxo de caixa incremental, que consolida as variações anuais de CAPEX e OPEX, se calcula o custo marginal de abatimento da tecnologia, métrica fundamental para avaliar sua relação de custo-efetividade em relação ao Cenário Base.

Assim, como resultados da MACC, o eixo x representa as emissões cumulativas reduzidas em relação ao Cenário Base, no qual as tecnologias propostas não foram implementadas. A largura de cada barra corresponde ao potencial de mitigação de emissões de GEE da tecnologia correspondente – quanto mais larga a barra, maior o potencial de redução. Já o eixo y representa o custo marginal de abatimento de cada tecnologia, sendo a altura da barra proporcional a esse custo, que representa a viabilidade econômica de opções de mitigação. Dessa forma, barras mais altas indicam custos marginais de abatimento mais elevados (WAYCARBON, 2022). A Figura 5 apresenta, de modo ilustrativo, uma MACC.

Figura 5: Exemplo de MACC



Fonte: Elaboração própria.

A MACC ilustrada na figura anterior organiza diferentes tecnologias de acordo com seu potencial de redução GEE, representado no eixo horizontal (em tCO<sub>2</sub>e), e seu custo marginal de abatimento, representado no eixo vertical (em R\$/tCO<sub>2</sub>e). O custo marginal de abatimento indica o custo líquido adicional (ou economia líquida) para reduzir uma tonelada de CO<sub>2</sub>e ao implementar uma tecnologia específica, em comparação com os custos do Cenário Base, considerando todo o horizonte de tempo da análise.



Nesse contexto, as tecnologias posicionadas abaixo do eixo x (Tecnologias 1 e 2) apresentam um custo marginal de abatimento negativo. Isso significa que, ao longo do período de avaliação considerado, o custo total de implementação e operação dessas tecnologias é inferior ao custo total da tecnologia do Cenário Base. Em outras palavras, além de proporcionarem redução de emissões, essas alternativas geram uma economia líquida, o que as torna financeiramente atrativas e capazes de se autossustentar no período avaliado, mesmo sem a necessidade de políticas de incentivo adicionais (DE OLIVEIRA, 2015).

Por outro lado, as tecnologias localizadas acima do eixo x (Tecnologias 3 e 4) têm um custo marginal de abatimento positivo. Isso indica que, ao longo do horizonte temporal, o custo total de implementação e operação dessas tecnologias é superior ao custo da tecnologia do Cenário Base. Embora contribuam para a redução de emissões, essas opções resultam em um custo líquido adicional por tonelada de CO<sub>2</sub>e abatida, sem que os benefícios operacionais compensem esse custo dentro do período analisado. Dessa forma, são consideradas menos custo efetivas sob a ótica financeira e podem requerer incentivos ou políticas específicas para viabilizar sua adoção.



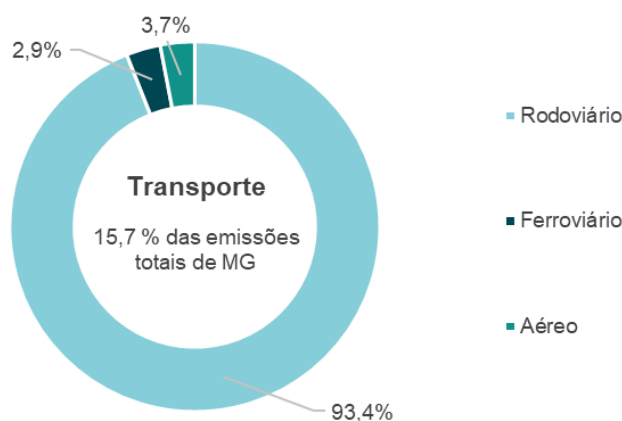
# METODOLOGIA APLICADA E RESULTADOS

Como ilustrado anteriormente, a definição dos cenários de descarbonização se baseia na identificação de padrões históricos entre as fontes de emissão e do crescimento de determinadas variáveis (por exemplo, PIB ou população). Esses padrões são utilizados como premissas para a avaliação de cenários futuros.

Nesse sentido, é importante trazer um panorama do setor de transporte mineiro no ano-base desta análise, o que ajudará a embasar a construção de cenários adequados ao contexto do estado nesse setor. Em 2019, o setor de transporte representou 15,7% das emissões totais e 61,3% das emissões do setor de energia no estado (MINAS GERAIS, 2022). A frota veicular, as operações ferroviárias, os movimentos aéreos e o uso de diferentes combustíveis são fatores que influenciam as emissões de transporte, indicando a complexidade do desafio enfrentado pelo estado para a descarbonização do setor.

O transporte rodoviário de Minas Gerais é o principal modal responsável pelas emissões de GEE, representando 93,4% das emissões do setor em 2019, conforme apresentado na Figura 6. A análise por tipo de combustível revela que o óleo diesel é o maior contribuinte, correspondendo a 67,1% das emissões, seguido pela gasolina comum, com 28,4% (MINAS GERAIS, 2022). Dessa forma, na ausência de ações de mitigação, espera-se que as emissões do setor aumentem sem que as participações dos modais e dos combustíveis no total sofram alterações significativas.

Figura 6: Representatividade dos modais nas emissões do setor de transporte



Fonte: Elaboração própria com base em MINAS GERAIS (2022).



## Cenário Base

O Cenário Base reflete a situação BAU, em que as estimativas de emissões são calculadas com base nas tecnologias atualmente utilizadas no estado. Nesse contexto, não são consideradas potenciais iniciativas voltadas para a descarbonização de Minas Gerais além daquelas já definidas por políticas nacionais e/ou estaduais.

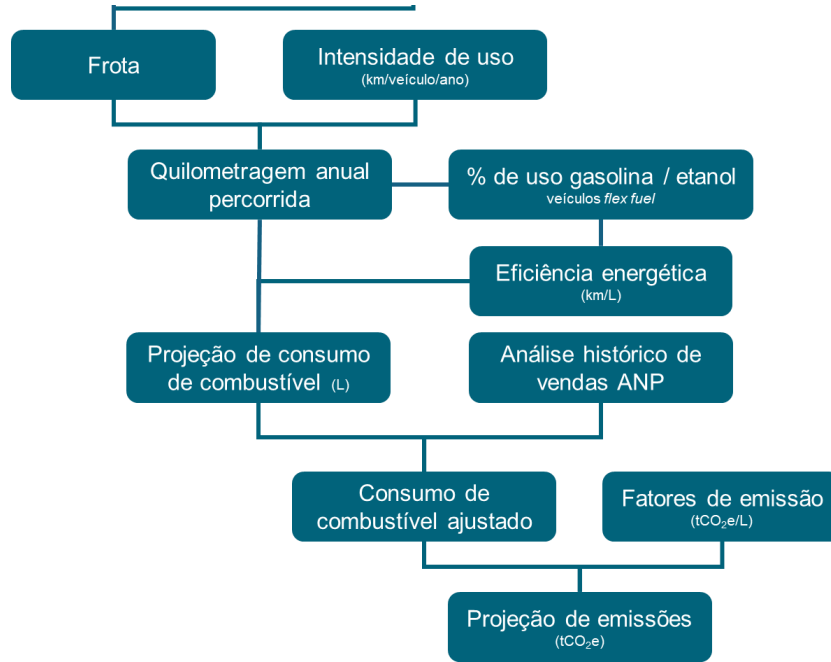
De modo geral, a modelagem utilizada no PDMG considerou análises setoriais a partir de um processo de *downscaling*, refinando projeções nacionais para o contexto de Minas Gerais. Ainda, integra oferta e demanda para otimizar a relação custo-efetividade das tecnologias de mitigação. Para a construção dos cenários no projeto Rota, conforme destacado na seção anterior, foram avaliados o transporte de passageiros e de cargas nos modais rodoviário, aéreo e ferroviário, considerando as metodologias *bottom-up* e *top-down*. A seção seguinte detalhará como cada metodologia foi aplicada para obter a projeção das emissões desses modais.

### **Bottom-up – rodoviário**

Para o modal rodoviário, foi adotada a metodologia bottom-up, desenvolvida em duas etapas sequenciais. A primeira etapa concentrou-se na estruturação do histórico de dados, que serve como base fundamental para as projeções, conforme demonstra o fluxo lógico apresentado na Figura 7. A segunda etapa dedicou-se à estimativa futura da frota circulante, do consumo de combustíveis e das respectivas emissões decorrentes da combustão, seguindo a metodologia detalhada na Figura 8. Essa metodologia em duas fases permite uma transição coerente entre a análise retrospectiva e as projeções, garantindo robustez metodológica ao estudo.

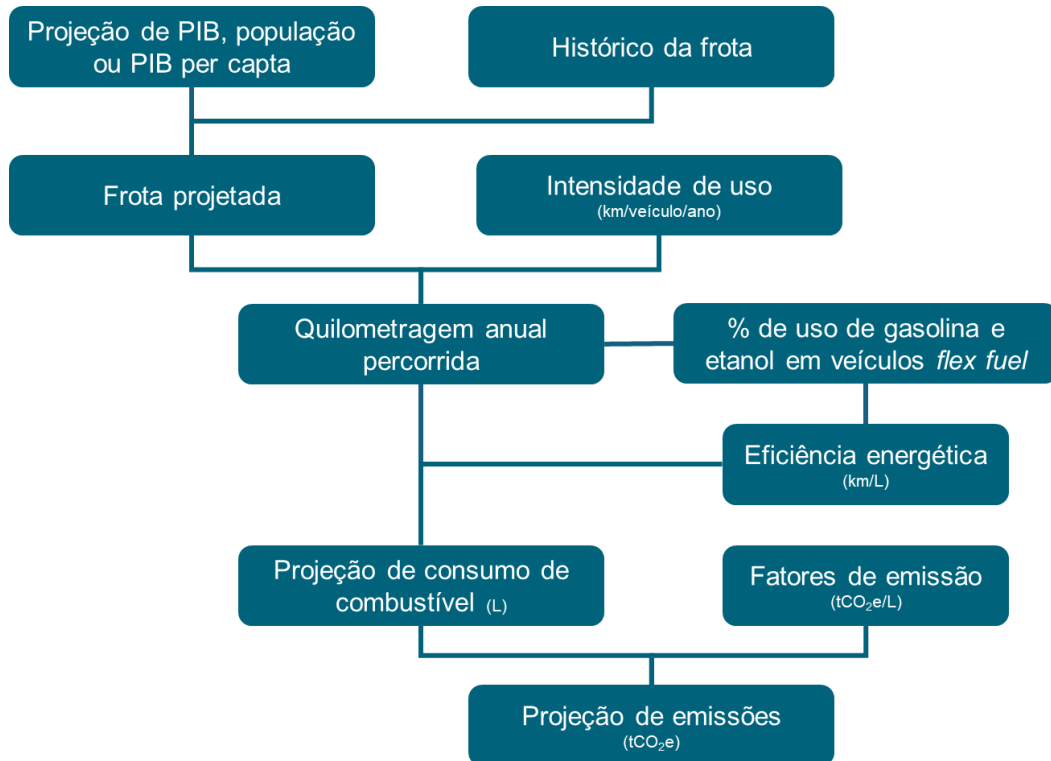


Figura 7: Metodologia bottom-up para o modal rodoviário – estruturação do histórico



Fonte: Elaboração própria.

Figura 8: Metodologia bottom-up para o modal rodoviário – projeções



Fonte: Elaboração própria.



Para a mensuração das emissões, o primeiro passo foi calcular o tamanho da frota, considerando o tipo e categoria do veículo (automóveis, motocicletas, veículos comerciais leves, ônibus e caminhões). Esse cálculo foi realizado com base em dados históricos de licenciamento de veículos no período de 2016 a 2023, obtidos a partir de *sites* e documentos oficiais das principais associações nacionais de fabricantes de veículos: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) e Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares (ABRACICLO).

Além disso, foram utilizados dados referentes à curva de sucateamento de veículos, obtidos conforme funções matemáticas apresentadas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2014) e pelo Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável (GONÇALVES, GOES e D'AGOSTO, 2019). Essas funções variam de acordo com o tipo de veículo, sendo a função Gompertz aplicada para veículos leves (comerciais leves e automóveis) e a função logística aplicada para os veículos pesados (ônibus e caminhões). As funções e os respectivos parâmetros de calibração ( $a$ ,  $b$  e  $t_0$ ) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Funções de sucateamento e parâmetros

Veículos	Função	Função de sucateamento	Parâmetro $a$	Parâmetro $b^2$ e $t_0^3$
Veículos leves	Gompertz	$S_{n,v,t} = e^{-e^{(a+b.t)}}$	1,798	-0,096
Comerciais leves	Gompertz	$S_{n,v,t} = e^{-e^{(a+b.t)}}$	1,798	-0,096
Ônibus	Logística	$S_{n,v,t} = \frac{1}{1+e^{a(t-t_0)}} + \frac{1}{1+e^{a(t+t_0)}}$	0,160	19,100
Caminhão	Logística	$S_{n,v,t} = \frac{1}{1+e^{a(t-t_0)}} + \frac{1}{1+e^{a(t+t_0)}}$	0,080	19,100

Fonte: Elaboração própria com base em Gonçalves; Goes; D'Agosto (2019).

Nas funções apresentadas:

$t$  é a idade do veículo em anos;

$S_{n,v,t}$  é a fração de veículos remanescentes, ainda não sucateados, no ano  $n$ , para o veículo  $v$ , na idade  $t$ .

Para os veículos leves, comerciais leves, caminhões e ônibus, cujo ano de produção foi até 2000, o cálculo de sobrevivência<sup>4</sup> foi realizado considerando a estimativa de frota do ano 2000, disponível no anuário estatístico de 2022 da ANFAVEA, (ANFAVEA, 2022) e as curvas de sucateamento citadas anteriormente. Para os anos seguintes, a frota foi calculada a partir do incremento dos licenciamentos anuais (disponíveis nos anuários estatísticos da ANFAVEA)

<sup>2</sup> No caso da função Gompertz.

<sup>3</sup> No caso da função logística.

<sup>4</sup> Quantidade de veículos de cada ano que compunha a frota de 2000.



e da subtração dos veículos sucateados, calculada a partir das fórmulas e parâmetros da Tabela 1.

Por sua vez, para motocicletas adotou-se a curva de sucateamento proposta por CREDIDIO e SERRA (2008), metodologia utilizada no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, com ano-base 2012, a fim de determinar o sucateamento anual de acordo com a idade do veículo, conforme representado na Tabela 2. Portanto, a frota circulante de motocicletas é estimada considerando tanto os veículos licenciados anualmente quanto aqueles removidos do sistema (sucateados).

Tabela 2: Função de sucateamento para motocicletas

Idade – motocicletas	Sucateamento anual
Até 5 anos	4,0%
Entre 6 e 10 anos	5,0%
Entre 11 e 15 anos	6,0%
Acima de 16 anos	8,0%

Fonte: Elaboração própria com base em Credidio e Serra (2008).

Além disso, devido à particularidade de Minas Gerais, onde a maioria das locadoras de veículos licencia os automóveis no estado, mas a frota circula em outras regiões do país, foram realizados ajustes na frota de veículos leves. Para esses ajustes, utilizaram-se como base os dados do Anuário Brasileiro do Setor de Locação de Veículos de 2024, bem como a representatividade da população do estado em relação ao total do Brasil.

Inicialmente, foi avaliada a proporção dos licenciamentos de veículos para locação em Minas Gerais em relação aos licenciamentos do Brasil para os anos de 2019 e 2023. Essas proporções foram utilizadas como premissas para calcular o valor da frota de veículos de locadoras registrados em Minas Gerais, uma vez que o anuário disponibilizava apenas informações de frota para o Brasil. Na sequência, avaliou-se a representatividade da população do estado em relação à população brasileira.

Enquanto a representatividade do total de licenciamento de veículos em Minas Gerais foi de 79% em 2019 e 63% em 2023 (Tabela 3), a representatividade da população do estado em relação à população brasileira foi de apenas 10% e 11%, respectivamente, no mesmo período. Dessa forma, para o cálculo da frota que foi emplacada em Minas Gerias que de fato circula no estado, utilizou-se a representatividade populacional como *proxy*, multiplicada pela frota de veículos de locadoras registrados em Minas Gerais. O resultado da frota de veículos locados que circula no estado foi dividido pelo valor total da frota nesses anos. Por fim, foi calculada a média das razões de 2019 e 2023, e esse valor médio foi aplicado à frota total dos demais anos da série histórica.



Tabela 3: Estimativa da frota das locadoras

Frota	2019	2023
Frota locadoras	997.416	1.570.820
Emplacamentos MG	428.834	369.974
Emplacamentos BR	541.346	590.870
Taxa de licenciamento locadoras MG	79%	63%
Frota licenciada em MG	790.116	983.571
População MG	21.168.791	21.634.690
População BR	210.147.125	203.078.309
Representatividade população MG	10%	11%
Frota licenciada em MG que circula em MG	79.591	104.783
Frota que deve ser desconsiderada	710.525	878.787
Frota MG	4.447.782	5.061.590
% que deve ser desconsiderado da frota anual	16%	17%

Fonte: Elaboração própria.

Feitos os devidos ajustes, a distância percorrida por veículos conforme o tempo de uso, disponibilizada por GONÇALVES, GOES D'AGOSTO (2019) e pelo MMA (2014), associada ao rendimento energético (km/L) de cada veículo, permitiram estimar o consumo de combustível da frota entre 2016 e 2023, considerando o tipo e a idade dos veículos, bem como o tipo de combustível utilizado.

Para os veículos comerciais leves, foi considerado que 38% da frota é composta por veículos a diesel, e o restante, por veículos *flex fuel*. Esse valor foi obtido a partir da média do licenciamento no Brasil ao longo dos últimos 19 anos. Essa proporção foi um dos parâmetros utilizados para ajustar o resultado do consumo de combustível com o valor de venda informado pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Ademais, também foram realizados ajustes nos valores de intensidade de uso de veículos leves, comerciais leves e ônibus, e no percentual de veículos *flex fuel* que abastecem com gasolina e etanol (escolha *flex*). Esses ajustes foram realizados a partir de percentuais que variavam anualmente, de forma a aproximar o resultado calculado ao resultado real de vendas informado pela ANP. O resultado médio ajustado da intensidade de uso e da escolha *flex* foi utilizado na estimativa do consumo de combustível.

Assim, com base nesse consumo estimado e nos fatores de emissão específicos de cada tipo de combustível, disponibilizados pela FGV (2024), foi possível então calcular as emissões do modal rodoviário entre 2016 e 2023.

Passando-se então à etapa das projeções, *realizam-se*, com base em cálculos de crescimento de variáveis como o PIB, a população ou o PIB *per capita*, foram realizadas estimativas para a evolução da frota de veículos. A partir dessa projeção, torna-se possível calcular o consumo de combustível, considerando a frota circulante, intensidade de uso dos veículos e do rendimento energético.



O histórico de PIB foi extraído de estudos da Fundação João Pinheiro (FJP, 2009; FJP, 2024a; FJP, 2024b). Para a projeção, adotou-se como premissa o mesmo ritmo de crescimento do PIB brasileiro, conforme estimado em DDP *Initiative* (2023). Em relação à população, tanto para o histórico quanto para as projeções foram utilizados dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000, 2024).

Uma vez coletadas as variáveis citadas acima, as estimativas de crescimento da frota são feitas observando-se o melhor ajuste estatístico, por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ),<sup>5</sup> entre as funções lineares, exponenciais ou logarítmicas e as três possíveis variáveis (PIB, população e PIB *per capita*). Os melhores ajustes foram obtidos com os dados de população, conforme apresentado na Tabela 4. Cabe ressaltar que, de forma conservadora, foi adotada a premissa da manutenção do consumo de combustível no mesmo patamar do ano anterior, nos casos em que as projeções apresentassem uma tendência de queda. Essa tendência de queda está relacionada à expectativa de diminuição da população a partir de 2040.

Tabela 4: Variáveis de projeção

Parâmetro	Veículo leve	Comercial leve	Caminhão	Ônibus	Moto
Equação	Exponencial $y = a \cdot e^{(b \cdot x)}$	Exponencial $y = a \cdot e^{(b \cdot x)}$	Exponencial $y = a \cdot e^{(b \cdot x)}$	Linear $y = ax + b$	Linear $y = ax + b$
Variável utilizada	População	População	População	População	População
$R^2$	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99
a	1345,6561004012	32,1114351964	130,63208099	0,00945	0,83905
b	0,0000003732	0,0000004806	0,00000034	-158299,5491	-14769331,37452

Nota: por meio da série histórica da venda de veículos, observa-se um padrão de crescimento com maior variação em veículos leves, comerciais leves e caminhões, adotando-se o modelo de projeção exponencial. Já para ônibus e motos, observou-se uma taxa de crescimento constante, adotando-se o modelo de projeção linear.

Fonte: Elaboração própria.

O cálculo do consumo de combustível considera três componentes principais: a frota circulante anual por categoria de veículo, o rendimento energético (em km/L) conforme dados da FGV (2024), e a quilometragem média anual apurada na fase de estruturação histórica do modal. Para a gasolina, adota-se o percentual fixo de 27% de etanol anidro, alinhado ao padrão vigente. No caso do diesel, aplica-se a progressão estabelecida em legislação para o biodiesel, que atinge 20% em 2030 (BRASIL, 2024). Os resultados consolidados do consumo projetado de combustíveis encontram-se detalhados na Tabela 5.

<sup>5</sup> Medida estatística que indica o quão bem uma equação explica a variabilidade de um conjunto de dados, sinalizando o quanto a variação nos dados observados pode ser explicada pela equação utilizada. Assim,  $R^2 = 1$  significa que a equação explica 100% da variabilidade dos dados, enquanto um  $R^2 = 0$  significa que a equação não explica a variabilidade dos dados.



Tabela 5: Projeção de consumo de combustível no modal rodoviário (10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)

Descritivo	Combustível	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Veículos leves	Gasolina comum	3.517	3.216	3.715	4.023	4.091	4.091	4.091
Veículos leves	Etanol hidratado	1.400	1.963	2.268	2.456	2.497	2.497	2.497
Veículos comerciais	Gasolina comum	558	785	946	1.048	1.071	1.071	1.071
Veículos comerciais	Etanol hidratado	192	461	555	615	628	628	628
Veículos comerciais	Diesel	583	574	690	765	782	782	782
Caminhões	Diesel	4.747	4.994	5.694	6.123	6.218	6.218	6.218
Ônibus	Diesel	1.033	1.257	1.351	1.403	1.414	1.414	1.414
Motos	Gasolina comum	524	449	487	507	512	512	512
Motos	Etanol hidratado	254	286	310	323	326	326	326

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, as emissões são estimadas a partir do consumo anual de combustível e dos respectivos fatores de emissão extraídos de FGV (2024). O resultado das emissões é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Projeção de emissões do modal rodoviário (10<sup>3</sup> tCO<sub>2</sub>e)

Descritivo	Combustível	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Veículos leves	Gasolina comum	5.923	5.416	6.255	6.774	6.889	6.889	6.889
Veículos leves	Etanol hidratado	20	28	32	35	35	35	35
Veículos comerciais	Gasolina comum	940	1.323	1.592	1.764	1.803	1.803	1.803
Veículos comerciais	Etanol hidratado	3	7	8	9	9	9	9
Veículos comerciais	Diesel	1.357	1.290	1.462	1.620	1.656	1.656	1.656
Caminhões	Diesel	11.052	11.233	12.059	12.967	13.168	13.168	13.168
Ônibus	Diesel	2.406	2.828	2.861	2.971	2.994	2.994	2.994
Motos	Gasolina comum	883	756	819	854	862	862	862
Motos	Etanol hidratado	7	6	7	7	7	7	7

Fonte: Elaboração própria.

## Top-down – ferroviário e aéreo

Para os modais ferroviário e aéreo, foi aplicada a metodologia *top-down*, que adota uma visão mais simplificada do sistema energético, devido a uma maior restrição de dados granulares, como características das frotas de aeronaves e locomotivas, fornecidos por esses setores. No caso das ferrovias, as emissões foram estimadas com base na atividade de transporte (P-km<sup>6</sup> e TKU<sup>7</sup>), pois é o dado estatístico informado pela Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT) que tem maior correlação com a demanda energética e consequentemente com as emissões, além do fato de ter um elevado coeficiente de determinação com o PIB. Enquanto

<sup>6</sup> P-km: passageiro-quilômetro é uma unidade de medida que contabiliza o transporte de um passageiro por um quilômetro, em um determinado modo de transporte.

<sup>7</sup> Tonelada Quilômetro Útil (TKU, na sigla em inglês): é determinado pela multiplicação da tonelada útil de carga transportada multiplicada pela distância média percorrida.



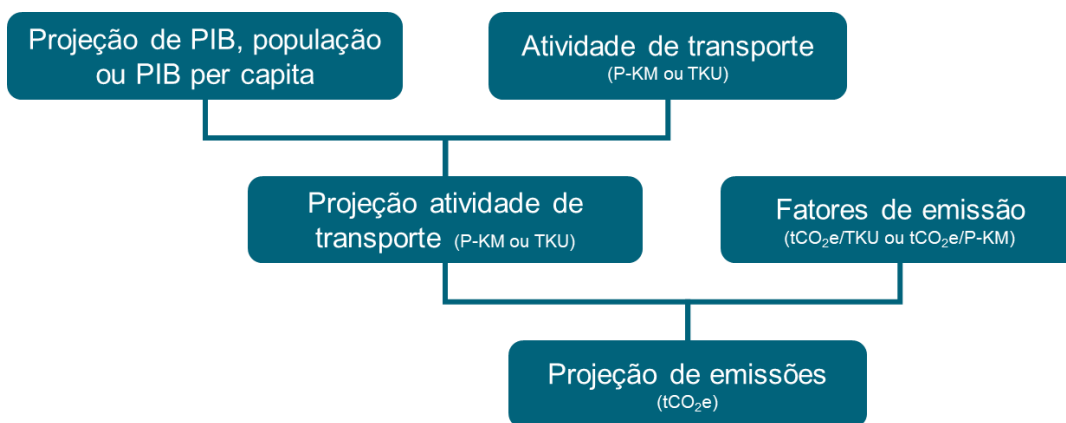
para as aeronaves, as emissões foram projetadas a partir do consumo de combustível, com base em dados históricos informados pelo setor.

Os cálculos das emissões de GEE do modal ferroviário partem da atividade de transporte nas ferrovias do estado de Minas Gerais, como listadas a seguir:

- Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM);
- Ferrovia Centro Atlântica (FCA);
- MRS Logística;
- Corporação de Gestão Ferroviária (RMC).

Para determinar as emissões disso, foram avaliados os dados históricos de PIB e PIB *per capita* de Minas Gerais provenientes da Fundação João Pinheiro (FJP, 2009; FJP, 2024a; FJP, 2024b), os dados de projeção de PIB da DDP *Initiative* (pressupondo para o estado o mesmo ritmo do crescimento do PIB nacional), dados históricos e projetados da população estadual oriundos do IBGE (2000, 2024), além dos dados concernentes ao volume de passageiros ou de carga transportada em cada uma das ferrovias e aos fatores de emissão do sistema ferroviário. A Figura 9 apresenta uma visualização simplificada desse processo. As emissões provenientes das linhas ferroviárias eletrificadas não foram contabilizadas no setor de transporte, visto que suas emissões, associadas exclusivamente à geração da energia elétrica, serão avaliadas no setor de energia.

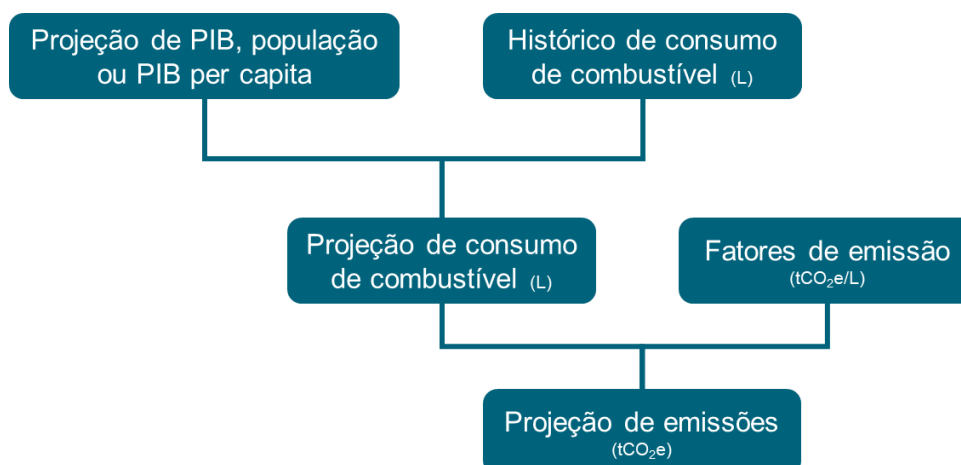
Figura 9: Metodologia *top-down* – ferroviário



Fonte: Elaboração própria.

Para o modal aéreo, devido à indisponibilidade de informações confiáveis sobre a atividade de transporte, a projeção foi feita a partir dos dados de vendas de combustíveis para a aviação, divulgados pela ANP, e dos mesmos indicadores econômicos e demográficos avaliados nos modais rodoviário e ferroviário, conforme representado na Figura 10.



Figura 10: Metodologia *top-down* – aéreo

Fonte: Elaboração própria.

As projeções foram realizadas a partir da aplicação de funções matemáticas que relacionam a atividade de transporte, no caso do modal ferroviário, e o consumo de combustível, no caso do modal aéreo, com os referidos indicadores (PIB, população e PIB *per capita*). A seleção das variáveis explicativas considerou o coeficiente de determinação ( $R^2$ ),<sup>8</sup> permitindo identificar qual combinação apresentava o melhor ajuste estatístico. Observou-se que, para o modal ferroviário, a variável população apresentou o maior poder explicativo; enquanto para o modal aéreo, o PIB mostrou a melhor correlação. Os parâmetros estatísticos e as equações utilizadas nessa modelagem encontram-se detalhados na Tabela 7.

Da mesma forma que ocorreu no modal rodoviário, foi adotada a premissa de que a atividade de transporte, ou o consumo de combustível, seguiria igual à do ano anterior, caso o resultado da projeção apresentasse uma tendência de queda. Essa tendência de queda ocorreu por causa de uma expectativa de diminuição da população a partir de 2040.

Tabela 7: Variáveis de projeção

Parâmetro	Ferrovário (TKU)	Ferrovário (P-km)	Aéreo (L)
Equação	Linear $y=ax+b$	Linear $y=ax+b$	Logarítimo $y=\ln(x)+b$
Variável utilizada	População	População	PIB
$R^2$	0,7222	0,9709	0,76275
a	0,0126930200	0,0001091100	97.562,18
b	-107.777,2343925800	-1.735,490637	-2.383.228,68

Nota: por meio da série histórica da venda de veículos, observou-se uma taxa de crescimento constante de trens vendidos ao longo dos anos, adotando-se o modelo de projeção linear. Já para os aviões, observou-se uma variação alta nos índices de venda ao longo dos anos, adotando-se o modelo de projeção logarítmico.

Fonte: Elaboração própria.

<sup>8</sup> Medida estatística que indica o quão bem uma equação explica a variabilidade de um conjunto de dados, sinalizando o quanto a variação nos dados observados pode ser explicada pela equação utilizada. Assim,  $R^2 = 1$  significa que a equação explica 100% da variabilidade dos dados, enquanto um  $R^2=0$  significa que a equação não explica a variabilidade dos dados.



Para o modal ferroviário, a projeção de TKU foi multiplicada pelo fator de emissão de cada uma das ferrovias, em tCO<sub>2</sub>e/TKU, disponível em FGV (2024). Os valores em p-km foram multiplicados pelo fator de emissão médio para transporte ferroviário de passageiros, disponível em UK (2024). A fim de entender a demanda, ao longo dos anos, por combustível utilizado como fonte energética no Cenário Base (sem mudança tecnológica), foi realizada a divisão das emissões pelo fator de emissão do diesel em tCO<sub>2</sub>, resultando no consumo de combustível pelo modal

Já para o modal aéreo, a projeção de consumo de combustível foi multiplicada pelo fator de emissão do querosene de aviação, em tCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>, disponível na ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol (FGV, 2024). A Tabela 8 e Tabela 9 apresentam as projeções de consumo de combustível e as emissões relacionadas a sua queima, respectivamente.

Tabela 8: Projeção de consumo de combustível no modal ferroviário e no modal aéreo (10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)

Modal	Combustível	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovário (carga)	Diesel	673	913	940	954	957	957	957
Ferrovário (passageiro)	Diesel	7	10	10	11	11	11	11
Aéreo	Querosene de aviação	148	306	317	328	339	349	358

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 9: Emissões do modal ferroviário e no modal aéreo (ktCO<sub>2</sub>e)

Modal	Combustível	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovário (carga)	Diesel	1.566	2.054	1.990	2.021	2.028	2.028	2.028
Ferrovário (passageiro)	Diesel	16	22	22	23	23	23	23
Aéreo	Querosene de aviação	375	777	804	832	859	884	908

Fonte: Elaboração própria.

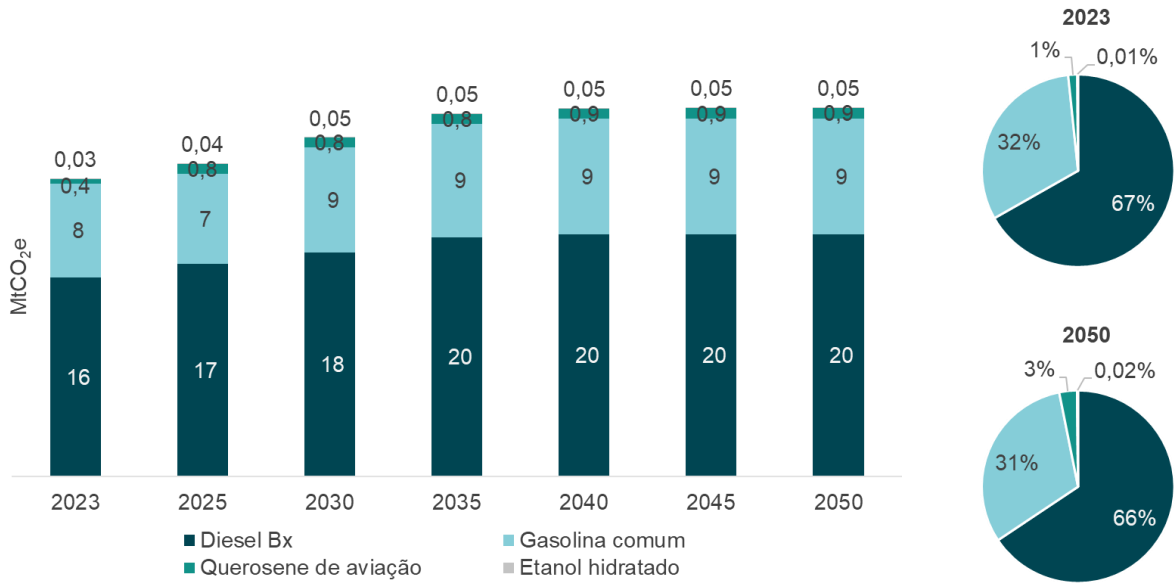
Em síntese, para o modal ferroviário, parte-se diretamente da atividade histórica de transporte em TKU, estabelecendo-se uma correlação com o crescimento populacional para projetar a demanda futura. Uma vez estimada a atividade de transporte, aplicam-se os fatores de emissão correspondentes para calcular as emissões. No modal aéreo, utiliza-se o consumo histórico de combustível e correlaciona-se com a projeção do PIB, resultando assim no consumo futuro. Com base nessa projeção e nos fatores de emissão para o querosene de aviação, calculam-se as emissões.

## Avaliação do Cenário Base



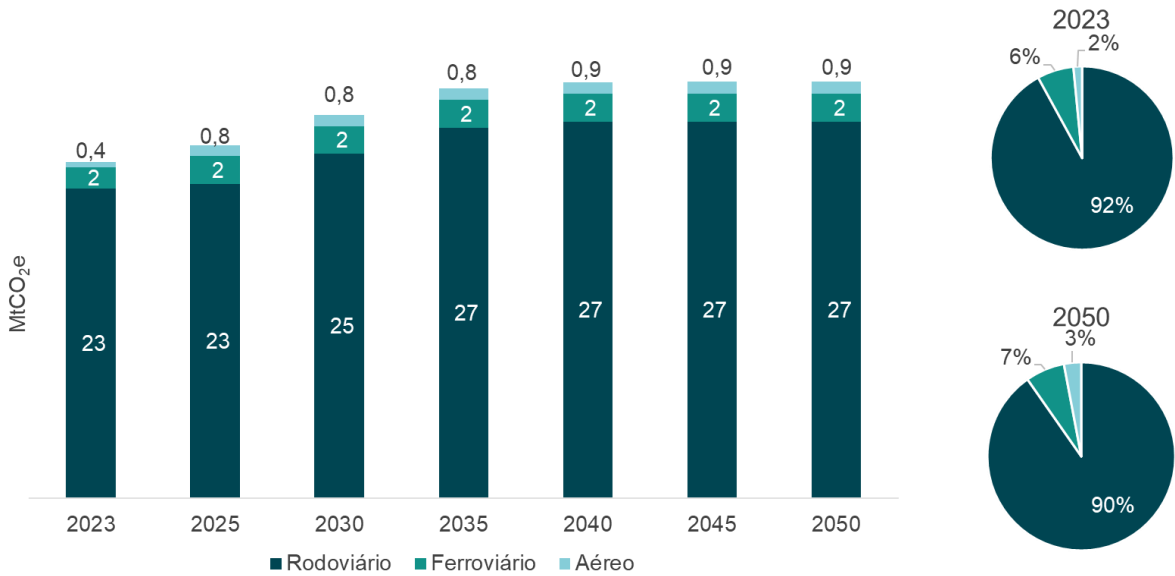
Os resultados obtidos por meio da aplicação das metodologias *bottom-up* e *top-down* sintetizados são ilustrados na Figura 11 e na Figura 12, por combustível e por modal, respectivamente.

Figura 11: Evolução das emissões de GEE no Cenário Base por combustível



Fonte: Elaboração própria.

Figura 12: Evolução das emissões de GEE no Cenário Base por modal



Fonte: Elaboração própria.



Observa-se na Figura 11, que a partir de 2023, na ausência de novas medidas de mitigação de emissões de GEE, o setor tende a aumentar suas emissões ao longo dos anos, dado o crescimento populacional e econômico que aumentam a demanda por transportes. Assim, o aumento das emissões em 2050 em relação ao ano-base (2023) chega a 24%, sendo cerca de 66% relacionadas a queima do diesel e 31% à queima da gasolina.

Ao analisar a Figura 12, tem-se o transporte rodoviário como o modal mais representativo, respondendo por cerca de 90% das emissões e configurando uma taxa de 22% de aumento de suas emissões de GEE. Cabe destacar que embora o transporte aéreo apresente baixa representatividade, com 3% das emissões do setor, este foi o modal que teve a taxa de crescimento mais acentuada até 2050, com acréscimo médio equivalente a cerca de 4,5% a.a. Ajuda a explicar esse comportamento o fato de não ter sido considerado a inserção de biocombustíveis na mistura regulamentada do querosene de aviação para o Cenário Base. Ainda, o segundo modal com maior crescimento proporcional é o ferroviário, com crescimento de cerca de 30%, menor dado o aumento esperado de biodiesel no diesel mineral.

As estimativas evidenciam que, na ausência de novas medidas de mitigação de emissões de GEE, o setor de transporte tende a aumentar suas emissões ao longo dos anos, dado o crescimento populacional e econômico que aumentam a demanda por deslocamentos de pessoas e cargas. É necessário, portanto, implementar novas rotas tecnológicas que visam a descarbonização do setor no estado para que as metas de redução de emissões sejam atingidas.

## Cenário *Net Zero*

Como ressaltado na seção anterior, existem diversas metodologias para a construção do Cenário *Net Zero*. Para o setor de transporte foram analisados quatro cenários:

- *Net Zero* do PDMG;
- DDS (*DDP Initiative*)
- *Network for Greening the Financial System* (NGFS);
- Contração Absoluta<sup>9</sup> do *Science Based Targets initiative* (SBTi).

## Plano de Descarbonização de Minas Gerais (PDMG)

Para o setor de transporte, a redução das emissões está associada a projetos como mudança modal, eletrificação e uso de biocombustíveis. Assim, são estimados 9,76 MtCO<sub>2e</sub> emitidos

<sup>9</sup> A abordagem de Contração Absoluta é um método para as organizações definirem metas de redução de emissões que sejam alinhadas com a taxa de redução de emissões anual global necessária para atingir o cenário de 1,5 °C. Assim, o método estabelece reduções anuais fixas de emissões, aplicável a todos os setores.



por transporte em 2050, o que representa uma redução de 60,24% em relação ao ano-base 2023. A trajetória de emissões projetadas pode ser observada na Tabela 10.

Tabela 10: Cenário PDMG

Ano	Emissões (MtCO <sub>2e</sub> )	Percentual de redução em relação ao ano-base (%)
2023	24,55	
2030	24,43	0,48%
2035	18,43	24,92%
2040	17,96	26,83%
2045	13,40	45,41%
2050	9,76	60,24%

Fonte: Elaboração própria com base em LABORATÓRIO CENERGIA/PPE/COPPE/UFRJ (2022).

## DDS (DDP *Initiative*)

O Cenário de Descarbonização Profunda (DDS, na sigla em inglês) da DDP *Initiative* (2023), cenário nacional, incorpora tecnologias de remoção e captura de carbono nos setores de energia e AFOLU, refletindo estratégias robustas para reduzir as emissões nestes segmentos-chave.

No setor de transporte, apesar dos resultados das emissões não terem sido desagregadas entre carga e passageiro, o modelo projeta que, ao se aplicar a tendência nacional, as emissões totais atingirão 13,11 MtCO<sub>2e</sub> em 2050, correspondendo a uma redução de 46,58% em relação ao ano-base de 2023. As reduções entre os anos em relação ao ano-base são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Cenário DDS – (DDP *Initiative*)

Ano	Emissões (MtCO <sub>2e</sub> )	Percentual de redução em relação ao ano-base (%) <sup>10</sup>
2023	24,55	-
2030	19,75	19,54%
2035	18,07	26,38%
2040	16,39	33,22%
2045	14,75	39,90%
2050	13,11	46,58%

Fonte: Elaboração própria com base em DDP *Initiative* (2023).

## NGFS (GCAM)

<sup>10</sup> Reduções negativas indicam aumento das emissões em relação ao ano-base.



Para o projeto Rota, a análise foi baseada em cenários com granularidade nacional, visto que o Brasil se diferencia em diversos fatores dos demais países, especialmente nos setores de energia e transporte, o que decorre da disponibilidade de energias renováveis e dos biocombustíveis no país. O cenário da NGFS)<sup>11</sup> extraído do *Global Change Assessment Model* (GCAM) destaca-se precisamente pela disponibilidade de informações em nível Brasil, além de ter granularidade setorial entre transporte de carga e passageiro.

Nesse contexto, dentre um conjunto de cenários avaliados para construção do cenário apresentado pela NGFS, foi selecionado o cenário “*Emission Kyoto Gases Transportation*” na unidade MtCO<sub>2</sub>e/ano, que se mostra adequado para representar o cenário *Net Zero* para o setor de transporte brasileiro. A partir dos valores de emissões para o Brasil ao longo dos anos, foram estimadas as reduções percentuais atingidas nos cenários. Essas reduções foram aplicadas nas emissões de Minas Gerais, no ano-base de 2023. Desse modo, foi possível obter as emissões do setor a cada 5 anos entre 2020 e 2050. No longo prazo, em 2050, o percentual de redução é de 99,70% em relação à 2023, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12: Cenário NGFS

Ano	Emissões (MtCO <sub>2</sub> e)	Percentual de redução em relação ao ano-base (%)
2023	24,55	-
2030	17,45	28,93%
2035	14,29	41,79%
2040	9,56	61,07%
2045	2,33	90,52%
2050	0,07	99,70%

Fonte: Elaboração própria com base em NGFS (2022).

Vale destacar que, nesse cenário, a redução de emissões até 2050 é bastante ambiciosa, e o setor de transporte alcançaria as emissões líquidas nulas no longo prazo sem depender dos demais setores.

## SBTi

Para o setor de transporte, foi considerado o método de contração absoluta da SBTi, com a ambição 1,5 °C. Esse método divide as metas em curto prazo (que devem ser atingidas entre 5 e 10 anos) e longo prazo (que devem ser atingidas até 2050). A meta de curto prazo exige uma redução linear de 4,2% ao ano entre os anos-base e o ano de atingimento da meta de

<sup>11</sup> A *Network for Greening the Financial System* (NGFS) é uma rede de bancos centrais e supervisores que se voluntaria a compartilhar as melhores práticas para apoiar o setor financeiro no gerenciamento de riscos climáticos e ambientais na transição para uma economia sustentável. A NGFS, em conjunto com especialistas em climatologia e economistas, projetou uma série de cenários hipotéticos que convergem em um ponto de referência comum. Os cenários climáticos foram criados para orientar os formuladores de políticas sobre os riscos das mudanças climáticas e identificar soluções. Desde 2020, a NGFS adota esses modelos visando identificar e compreender os possíveis impactos econômicos e financeiros das mudanças climáticas (NGFS, 2024).



curto prazo. Já para metas de longo prazo, é necessária uma redução de 90% das emissões em relação ao ano-base.

Nesse contexto, foram utilizadas as emissões calculadas para o estado de Minas Gerais em 2023 (ano-base) e uma redução de 90% em 2050 (ano alvo), conforme representado na Tabela 13.

Tabela 13: Cenário SBTi

Ano	Emissões (MtCO <sub>2e</sub> )	Percentual de redução em relação ao ano-base (%)
2023	24,55	-
2030	20,66	15,85%
2035	16,71	31,92%
2040	12,77	47,99%
2045	8,82	64,06%
2050	2,45	90,00%

Fonte: Elaboração própria com base em SBTi (2024).

Ressalta-se que, mesmo tendo metas setoriais específicas para transporte, a SBTi não dispõe de um modelo atualizado que aborde a ambição 1,5 °C para todos os modais de transporte. Dessa forma, a abordagem utilizada não permite granularidade setorial ou territorial – ou seja, não captura as especificidades do setor de transporte brasileiro.

## Avaliação dos Cenários Net Zero

No contexto do Cenário *Net Zero*, diversos modelos vêm sendo desenvolvidos para aprimorar a análise do impacto das mudanças climáticas na economia. Enquanto o cenário do PDMG tem desagregação para o setor de transporte de Minas Gerais, os cenários DDS – (DDP *Initiative*) e NGFS têm desagregação voltada ao setor de transporte em nível nacional. Já o cenário SBTi propõe uma trajetória de descarbonização mais ampla, aplicável para todos os setores e países. O Quadro 1 sintetiza as principais características de cada modelo avaliado nas seções anteriores.

Quadro 1: Características dos Cenários Net Zero

Cenários	Tem dados regionalizados para o Brasil?	Tem dados regionalizados para Minas Gerais?	Tem desagregação setorial compatível com o estudo?	Tem desagregação subsetorial (modais) compatível com o estudo?
PDMG (BLUES/COPPE)	✓	✓	✓	✓
NGFS (GCAM)	✓	✗	✓	✓



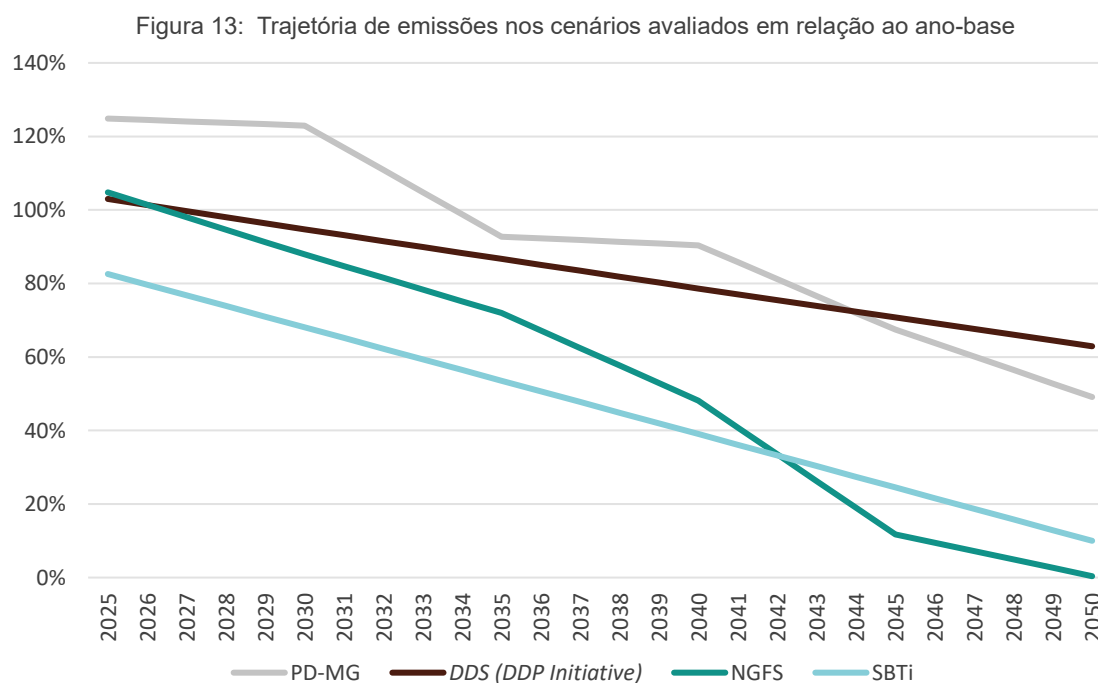
Cenários	Tem dados regionalizados para o Brasil?	Tem dados regionalizados para Minas Gerais?	Tem desagregação setorial compatível com o estudo?	Tem desagregação subsetorial (modais) compatível com o estudo?
DDS – (DDP Initiative)	✓	✗	✓	✗
SBTI (IEA)	✗	✗	✗	✗

Fonte: Elaboração própria.

Todos os modelos analisados apresentam vantagens e limitações que merecem consideração. Mesmo o cenário do PDMG requer atualização, já que desde sua elaboração passaram a ganhar destaque novas tecnologias que não foram originalmente incorporadas – como a eletrificação parcial de veículos leves, o uso de biometano e *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO) em veículos pesados, e os caminhões movidos a hidrogênio. Além disso, as tecnologias já previstas no PDMG poderiam ser reavaliadas à luz das atuais perspectivas de desenvolvimento de Minas Gerais.

As distintas abordagens metodológicas empregadas por cada modelo geram, naturalmente, projeções variadas para as necessidades de redução de emissões, como demonstrado na Figura 13.

Essa variação reforça a importância de se considerar múltiplas abordagens para uma análise mais robusta.

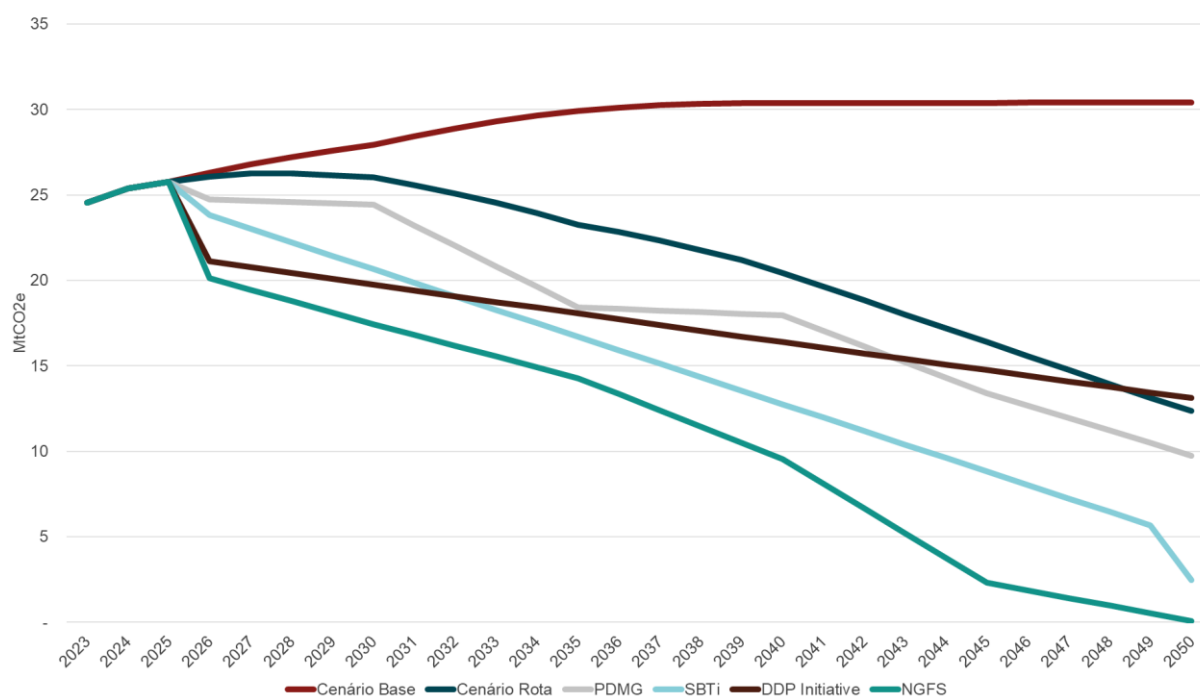


Fonte: Elaboração própria.



A partir das reduções dos Cenários *Net Zero*, é possível observar o esforço necessário para o setor de transporte de Minas Gerais se tornar aderente a cada uma dessas trajetórias, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14: Trajetória de emissões nos cenários avaliados



Fonte: Elaboração própria.

É importante destacar que o objetivo deste estudo não é atingir completamente os marcos de redução de emissões previstos nos cenários avaliados, mas sim utilizá-los como orientadores para possíveis metas, dado que os cenários não refletem necessariamente a realidade atual do estado.

## Cenário Rota

Como ressaltado anteriormente, por meio da MACC, é possível avaliar o custo e o potencial de mitigação para diversas tecnologias, facilitando a priorização daquelas com maior impacto na redução de emissões em relação aos recursos investidos. No setor de transporte, que envolve a análise tanto do transporte de passageiros quanto do de cargas, a aplicação da MACC é especialmente pertinente devido ao impacto significativo do setor nas emissões do estado.

## Tecnologias incluídas na MACC

No produto 2.1 Diagnóstico Setorial (P2.1), foi aplicado um método de classificação e hierarquização das tecnologias levantadas e analisadas, atribuindo notas baseadas em diferentes critérios. O modelo conceitual desenvolvido pela Accenture e adaptado pela WayCarbon se divide em 3 passos: mitigar a base, acelerar a transição e estender a fronteira (ACCENTURE, 2020).



As informações apresentadas no Diagnóstico Setorial destacam a importância do setor de transporte na descarbonização do estado de Minas Gerais. As tecnologias disponíveis, apontadas e avaliadas no estudo, mostraram que há diversas estratégias possíveis para reduzir as emissões de GEE no setor. A Figura 15 apresenta a classificação das tecnologias após a avaliação conduzida e detalhada no P2.1.

Figura 15: Resultado da avaliação das tecnologias



Fonte: Elaboração própria.

Todavia, para fins de estimativa da MACC, as tecnologias foram organizadas em quatro grupos. Essa organização foi realizada com base na similaridade entre seus protocolos de cálculo e premissas utilizadas. Esses grupos são detalhados a seguir.

**Grupo 1 – Sistemas de propulsão alternativos:** esse grupo engloba tecnologias que substituem os motores de combustão interna convencionais por sistemas de propulsão alternativos mais eficientes e menos intensos em carbono, como veículos elétricos a bateria, veículos híbridos *flex*, veículos movidos a células de combustível a hidrogênio e outros sistemas alternativos. Além disso, também engloba as tecnologias de conversão dos motores a diesel para o uso de gás natural e biometano, nesse caso, além da mudança no sistema de propulsão, avalia-se também a substituição do combustível para um biocombustível, ampliando o potencial de redução de emissões da tecnologia.

No que diz respeito ao CAPEX, inclui-se o custo adicional de aquisição desses veículos em relação aos convencionais, bem como investimentos em infraestrutura de suporte, como a instalação de carregadores domiciliares e a construção de redes de recarga rápida em locais públicos para veículos elétricos. Em alguns casos, também são necessários investimentos em subestações elétricas, para adequar a tensão à demanda de carregamento.

Por sua vez, o OPEX engloba as diferenças entre os custos de manutenção, com base em dados de montadoras representativas, e as possíveis economias em energia, estimadas com base na eficiência energética dos veículos e no custo da energia utilizada. Além disso, a



mitigação esperada é calculada comparando-se as emissões do tanque à roda, ou *tank-to-wheel* (TTW), dos veículos alternativos com as emissões dos veículos convencionais correspondentes.

**Grupo 2 – Troca da fonte de energia para biocombustíveis convencionais:** esse grupo abrange alternativas como o etanol anidro, o etanol hidratado e o biodiesel. A análise inicial avalia a necessidade de adaptações nos veículos, incluindo a troca de motor, filtros e modificações de software, fatores que impactam diretamente o CAPEX.

Além disso, o rendimento energético do veículo, ao utilizar os novos combustíveis e/ou biocombustíveis, é avaliado com base no Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV). Na ausência de dados específicos, considera-se o poder calorífico inferior das fontes energéticas e relatórios com casos reais de aplicação desses combustíveis alternativos. Com essas informações, estima-se o consumo anual e os custos de operação no cenário proposto, comparando-os com o Cenário Base. Em relação às emissões, avaliam-se os GEE associados ao novo combustível/biocombustível em relação às emissões do combustível substituído.

**Grupo 3 – Troca da fonte de energia para biocombustíveis avançados:** esse grupo inclui tecnologias como o diesel verde e o combustível sustentável de aviação (SAF, na sigla em inglês). A análise dessas alternativas é diferenciada, pois esses biocombustíveis têm uma estrutura química praticamente idêntica aos equivalentes fósseis, eliminando a necessidade de adaptações nos veículos (MME, 2022; LUCANTONIO *et al.*, 2023), especialmente nos modelos mais recentes ou em determinadas misturas a depender da rota de produção. Isso simplifica a análise, pois o CAPEX não é impactado. O foco da análise está no custo operacional (OPEX), considerado a diferença de preço entre o biocombustível e o combustível substituído, já que o rendimento energético permanece inalterado. Além disso, compara-se as emissões do tanque à roda (TTW), destacando o potencial de redução de emissões associado à substituição.

**Grupo 4 – Ampliação da infraestrutura de modos de alta capacidade:** esse grupo inclui investimentos para expandir ou modernizar sistemas de transporte menos intensos em energia e, conseqüentemente, em carbono, como o ferroviário. O CAPEX abrange os custos de implementação, como a construção de novos trechos ferroviários, enquanto o OPEX considera as economias geradas pela substituição de modais menos eficientes. Um exemplo prático é o deslocamento de parte da demanda do transporte rodoviário de cargas para o ferroviário, reduzindo a circulação de caminhões pesados nas rodovias. A mitigação das emissões é calculada comparando-se as emissões do novo modal com o do modal substituído.

## Tecnologias não incluídas an MACC

Importante destacar que algumas tecnologias não foram incluídas na MACC devido à falta de dados confiáveis, tanto operacionais, como rendimento energético e custos de manutenção,



quanto de mercado, como o valor dos ativos e da infraestrutura necessária. Além disso, a baixa maturidade dessas tecnologias em relação aos resultados práticos obtidos limitou sua inclusão na análise. A ausência dessas informações inviabiliza a realização de estimativas robustas. Ainda assim, tais tecnologias serão apresentadas, de forma complementar, com o objetivo de aplicar a análise sobre as medidas de mitigação do setor de transporte e apoiar sua consideração em estudos futuros. As tecnologias abordadas são:

- eletrificação a pilha de combustível movida a etanol;
- uso de hidrogênio de baixo carbono em ônibus;
- eletrificação a pilha de combustível movida a hidrogênio e uso de hidrogênio de baixo carbono em veículos leves;
- eletrificação de ferrovia para o transporte de carga.

**Eletrificação a pilha de combustível movida a etanol** – essa tecnologia ainda não é comercializada em larga escala no mercado, conforme observado na literatura (ZAPAROLLI, 2021). Atualmente, projetos estão sendo desenvolvidos por montadoras como Nissan e Volkswagen, porém, com poucos dados que viabilizem uma análise robusta da tecnologia. Assim, o objetivo deste relatório é trazer informações disseminadas sobre a tecnologia conforme divulgação desses projetos na literatura.

Em 2019, no Brasil, foi firmado um acordo de parceria entre a montadora de veículos Nissan e o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). O objetivo dessa colaboração foi desenvolver uma tecnologia que permita usar o etanol para promover a mobilidade elétrica.

Essa tecnologia utiliza a célula de combustível de óxido sólido (SOFC, na sigla em inglês), permitindo que veículos sejam abastecidos com etanol em qualquer posto no país, aproveitando a infraestrutura já existente e amplamente disseminada. O sistema aproveita o hidrogênio contido no etanol ( $C_2H_6O$ ) para gerar energia, o que representa um avanço significativo no setor de transporte sustentável (ZAPAROLLI, 2021).

A expectativa é que, até 2030, veículos equipados com a tecnologia SOFC estejam disponíveis e sejam comercializados no mercado brasileiro. No entanto, ainda há desafios importantes a serem superados para que essa nova tecnologia seja amplamente adotada, como o aprimoramento do desempenho relacionado à alta densidade de potência e reformador interno, a necessidade de escalabilidade com redução de custos e compatibilidade com célula suportada no metal (MS-SOFC, na sigla em inglês), além de melhorias da durabilidade frente a fatores como o tempo de inicialização, ciclo de oxidação, ciclo térmico e operação prolongada (BRASIL, 2022).

Em 2021, a montadora Volkswagen anunciou um projeto similar, em parceria com a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), com o objetivo de desenvolver um sistema de célula de combustível baseado no uso de etanol para alimentar veículos elétricos. A meta é tornar esse sistema viável para produção e comercialização em escala mundial.



Contudo, em ambos os casos, por se tratar de uma tecnologia em estágio inicial, com foco no desenvolvimento de protótipos, ainda apresenta baixa maturidade. Como resultado, faltam dados robustos referentes a testes, desempenho e custos de referência, o que representa um desafio para a viabilização de projetos de eletrificação utilizando pilha de combustível movida a etanol.

**Uso de hidrogênio de baixo carbono em ônibus** – para essa tecnologia, verificou-se que em 2022 a Shell Brasil, a Raízen, a Hytron, a Universidade de São Paulo (USP) e o Senai firmaram um acordo para desenvolver equipamentos capazes de produzir hidrogênio a partir do etanol. Esse projeto inclui a instalação de uma estação-piloto no campus da USP, destinada a fornecer hidrogênio para abastecer um ônibus utilizado por estudantes (BNDES, 2022).

Dando continuidade ao acordo firmado entre as instituições mencionadas, em fevereiro de 2025 foram iniciados os testes para avaliar a taxa de conversão do etanol em hidrogênio. Essa avaliação está sendo realizada na primeira estação experimental do mundo dedicada à produção de hidrogênio renovável a partir de biocombustíveis. O projeto, que recebeu um investimento de R\$ 50 milhões, servirá como fonte de dados para analisar os índices de consumo e o rendimento do combustível em veículos, incluindo três ônibus e dois veículos leves. Porém, cabe salientar a ausência de dados operacionais e comparativos, por se tratar de uma nova tecnologia.

Ademais, com base na análise dos custos de produção do hidrogênio de baixo carbono, considerando fontes de eletricidade provenientes de energia eólica (*onshore* e *offshore*) e solar, além de restrições geográficas, como o uso da terra e a disponibilidade de água, um estudo identificado na literatura indicou que, no cenário otimista global, os custos de produção poderiam atingir 0,65 US\$/kg de hidrogênio. Já no cenário pessimista, toda a demanda projetada poderia ser atendida a um custo de 1,25 US\$/kg (CHIAPPINI, 2025).

**Eletrificação a pilha de combustível movida a hidrogênio e uso de hidrogênio de baixo carbono em veículos leves** – para essa tecnologia, observa-se uma baixa maturidade, quanto à disponibilidade e oferta de hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis e à infraestrutura, que envolve armazenamento e fornecimento de hidrogênio e até a criação de redes de reabastecimento (XU, 2022). Porém, a partir da literatura, é possível ter dados e informações que podem auxiliar a análise futura à medida que a tecnologia amadurece.

Como exemplo de implementação da tecnologia, destaca-se o *case* Toyota Mirai (tecnologia compressão/hidrogênio), que, entre 2014 e 2015, lançou o primeiro veículo elétrico híbrido a pilhas de combustível (FERONI *et al.*, 2024), com autonomia de 1.360 km utilizando 5,6 kg de hidrogênio. No entanto, é evidenciado que o carro é vendido apenas na Califórnia, exceto pelo modelo sedan que foi comercializado no Japão (FERREIRA, 2024). E enfrenta desafios como: (i) congelamento das bombas após abastecimento; (ii) escassez de hidrogênio; (iii) aumento do preço do hidrogênio de 12 US\$/kg em 2022 para 36 US\$/kg em 2024; e (iv) inconsistência entre a autonomia anunciada e a prática.



Além disso, a Toyota, em parceria com a USP, anunciou um projeto piloto para a produção de hidrogênio a partir de etanol. A planta teve um investimento de 50 milhões de reais e tem capacidade para a produção de 100 quilos de hidrogênio por dia (AUTOINDÚSTRIA, 2025).

Para o transporte público de passageiros, pode ser citado o projeto nacional da COPPE/UFRJ, o ônibus híbrido elétrico-hidrogênio, no qual, em 2024, ocorreu a primeira viagem com passageiros do protótipo, no município de Maricá (RJ). Trata-se de uma parceria entre o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) e a empresa Tracel Industrial, com objetivo de realizar a produção e a montagem dos ônibus diretamente em Maricá, impulsionando a economia e a inovação tecnológica local (COPPE/UFRJ, 2024). O hidrogênio utilizado é de origem natural, proveniente da jazida existente em Maricá (MARICÁ, 2023, 2024).

Nesse contexto, também foram avaliados estudos que comparam o custo total de propriedade (TCO, na sigla em inglês)<sup>12</sup> dos veículos a gasolina com os veículos elétricos a pilha combustível de hidrogênio. Segundo estudo do TNA\_Brazil (2021), o TCO de veículos a gasolina foi identificado como 0,355 US\$/km, enquanto, para veículos elétricos movidos a células de combustível a hidrogênio, o valor médio foi de 0,52 US\$/km. Além disso, o estudo estimou que veículos elétricos com células de combustível a hidrogênio apresentaram um custo de abatimento de 3.578,6 US\$/tCO<sub>2e</sub>, considerando um potencial de mitigação de 13.926,2 GgCO<sub>2e</sub>.

Ainda na literatura, foi possível identificar um estudo de análise do *benchmarking* do rendimento energético e do TCO entre o ônibus elétrico e o ônibus elétrico a pilha de combustível a hidrogênio. Nesse caso, foi relatado que um ônibus elétrico consome, em média, 120 kWh para percorrer 100 km. Já um ônibus elétrico a célula de combustível (FCEV, na sigla em inglês) consome 264 kWh para cobrir a mesma distância, para tal são necessários 8 kg de hidrogênio. Estimativas apontam que, em 2024, o TCO seria de aproximadamente 2,35 US\$/km<sup>13</sup> (9,19 PLN/km) para o ônibus elétrico e de 3,69 US\$/km (14,52 PLN/km) para o ônibus elétrico a célula de combustível (SZULC; KRAWCZYK, 2023).

Na literatura também foi possível identificar uma análise de *benchmarking* do uso de hidrogênio de baixo carbono em veículos leves *versus* veículos leves a gasolina. De acordo com He *et al.* (2020), estima-se que seriam necessários entre 1,63 e 2,31 bilhões de kg de hidrogênio obtido a partir de fontes renováveis, como energia eólica, para substituir aproximadamente 4,89 a 6,92 bilhões de galões de gasolina nas cidades de Sindh e Punjab, no Paquistão.

---

<sup>12</sup> TCO: método de avaliação de investimentos em relação ao custo operacional, à qualidade, à logística, à vantagem tecnológica, à confiabilidade e capacidade do fornecedor, à manutenção, ao custo de inventário e de transação, ao ciclo de vida, ao preço inicial, ao custo relacionado ao cliente e ao custo de oportunidade (SZULC; KRAWCZYK, 2023), levando em consideração a contabilização das despesas operacionais (OPEX) e o capital de investimento (CAPEX) (INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION, 2021).

<sup>13</sup> Conversão da moeda PLN (Zloti polonês) com base no valor do dólar em dezembro de 2023, ano em que o artigo foi desenvolvido.



Cabe enfatizar que o custo do hidrogênio, quando levado em consideração o VPL, tem um valor elevado devido a fatores como altos custos de investimentos iniciais, altos custos operacionais para a produção, baixa eficiência energética (quando comparado aos veículos elétricos a bateria), ausência de economia de escala, além de incertezas tecnológicas e regulatórias, fazendo com que o grupo técnico priorize outras tecnologias de descarbonização.

**Eletrificação de ferrovia para o transporte de carga** – essa tecnologia ainda se encontra em fase de discussão, devido tanto à já baixa intensidade de carbono associada a esse modal quanto à limitada maturidade dos resultados obtidos de estudos até o momento, observados em poucos projetos. Entre eles, destacam-se o estudo de eletrificação da Estrada de Ferro Carajás (EFC) conduzido pela Vale S.A. e a discussão do projeto que visa a implementação da Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL) – Trecho 1 (Ilhéus-Barreiras).

Um estudo conduzido pelo Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS) analisou os custos relacionados ao CAPEX (investimento de capital) e ao OPEX (custos operacionais) de uma ferrovia eletrificada em comparação com uma ferrovia diesel-elétrica. O modelo de referência utilizado foi baseado na implantação de uma ferrovia *greenfield*, ou seja, em um terreno ainda não construído, localizado na região Centro-Oeste do Brasil. A concessão foi projetada para um período de 50 anos, com capacidade estimada de transporte de aproximadamente 90 milhões de toneladas de carga por ano.

Como resultado, observou-se que a implementação de uma ferrovia eletrificada requer um CAPEX de 10% a 18% superior ao de uma ferrovia que utiliza locomotivas a diesel, especialmente quando há geração própria de energia para transmissão. No entanto, em relação ao OPEX, foi constatada uma redução de 55% ao longo de 10 anos no caso da ferrovia eletrificada em comparação com a ferrovia diesel-elétrica.

Para essa tecnologia, os principais desafios estão associados ao alto custo de implementação, à necessidade de renovação da frota e à baixa priorização governamental em investimentos – embora tenham potencial para reduzir o consumo de diesel, especialmente porque os trens de carga tendem a ser mais leves, permitindo o aproveitamento da frenagem regenerativa e o acesso à energia a partir de fontes renováveis (SANTOS, 2023).

Diante das tecnologias, dados e informações apresentados nesta subseção, destaca-se a necessidade de monitorar o grau de maturidade tecnológica, o avanço dos projetos em curso, os resultados obtidos e suas implementações, e a evolução de marcos regulatórios que possam viabilizar suas implementações. A integração dessas tecnologias na MACC e em futuras atualizações deste estudo dependerá diretamente da disponibilização de dados referentes ao seu valor de mercado, desempenho operacional, incluindo rendimento energético, intensidade de carbono; e custos operacionais.

## Premissas e avaliação do Cenário Rota



É fundamental destacar que a ordem de entrada das tecnologias no cenário influencia diretamente os resultados esperados de mitigação. Por exemplo, a eletrificação da frota em um cenário em que já se prevê um aumento significativo na demanda de etanol resultaria em reduções de emissões inferiores às estimadas, caso essa medida fosse avaliada diretamente em relação ao Cenário Base. Sendo assim, para a construção da MACC, as tecnologias foram inseridas no cenário de acordo com a sua classificação, iniciando pelas de maior nota e avançando para as de menor nota (as notas podem ser observadas na Tabela 14 e detalhadas no produto 2.1). Essa abordagem busca garantir que a eficácia de cada medida seja avaliada considerando-se as interações com ações já implementadas.

Dessa forma, este protocolo aprimora a análise do cenário projetado na metodologia MACC, que avalia os impactos conjuntos e interdependentes das tecnologias. Ao utilizar a pontuação do P.2.1 para definir a ordem de inserção das tecnologias, o protocolo garante que o processo de análise leve em conta a influência dessa sequência de maneira lógica e consistente, contribuindo para uma tomada de decisão estratégica para a descarbonização do setor de transporte de Minas Gerais.

Para fundamentar a avaliação das tecnologias de descarbonização, o estudo baseou-se em uma revisão documental abrangente. Essa revisão incluiu documentos estratégicos de Minas Gerais, como o Plano de Descarbonização (PDMG) e o Plano de Ação Climática (PLAC-MG), além de uma série de estudos relevantes conduzidos por instituições nacionais (a exemplo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e da ANFAVEA), agências internacionais (como a *International Energy Agency* (IEA) e o *United Nations Environment Programme* (UNEP)) e iniciativas do setor privado (como *BloombergNEF*), oferecendo uma visão ampla das tecnologias no médio (2035) e longo prazo (2050).

A partir das projeções, dados e informações levantadas nessas referências,<sup>14</sup> e considerando as características específicas do estado de Minas Gerais, bem como a *expertise* da equipe técnica para interpretar e adaptar esses dados ao contexto local, foi determinado o percentual de aplicação projetado para cada tecnologia ao longo do horizonte de estudo, apresentado na coluna “Premissa considerada (%)”, na Tabela 14. Esse percentual é um dado fundamental, pois ele quantifica a escala de implementação de cada tecnologia no cenário, sendo essencial para o cálculo de seus respectivos custos e benefícios. A Tabela 14 apresenta os valores máximos atingidos no último ano de análise, os valores intermediários podem ser consultados nas fichas técnicas de cada tecnologia, no anexo deste documento, e foram definidos a partir de dados disponíveis na literatura e regulamentações, ou, na ausência desses dados, em interpolações (em sua maioria, lineares).

---

<sup>14</sup> Fontes consideradas para embasar as estimativas e oferecer suporte às análises realizadas: Plano Nacional de Logística (2021); *International Energy Agency* (2021, 2024); Sen *et al.* (2023); Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (2024); BloombergNEF (2024); Empresa de Pesquisa Energética (2023; 2024a, b); *United Nations Environment Programme* (2024); Araújo *et al.* (2024); Shell (2024); DDP *Initiative* (2023); La Rovere *et al.* (2023); e Keramidas *et al.* (2025).



Com base nesse percentual de aplicação definido, foram então estimados o VPL, o potencial acumulado de redução de emissões de GEE e o custo marginal de abatimento associado a cada tecnologia. A Tabela 14 apresenta detalhadamente todos esses resultados quantitativos para cada tecnologia, oferecendo uma visão clara de sua viabilidade econômica e do impacto ambiental esperado no contexto avaliado. A representação gráfica desses resultados na forma da MACC é apresentada na Figura 16.

As fichas técnicas de cada uma das tecnologias avaliadas, contendo as premissas, o horizonte de análise, a aplicação da tecnologia em cada ano, a redução anual de GEE e o fluxo de caixa, podem ser observadas nos anexos deste produto.



Tabela 14: Síntese das premissas e dos resultados da MACC – setor de transporte

Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Nota	Limite inferior (%) <sup>1</sup>	Limite superior (%) <sup>1</sup>	Metas do PLAC-MG <sup>1</sup>	Premissa considerada (%) <sup>1</sup>	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )
<b>Transporte de passageiros</b>									
Aumento do uso de etanol em veículos leves (G2)	Aumento da participação do etanol hidratado frente à gasolina C (% de venda/ano)	54	35 <sup>2</sup>	90	Ampliar em 50% a participação na demanda energética	80	-11,49	0,97	84,75
	Aumento da mistura regulamentada (% em volume) de etanol anidro na gasolina		27	35		35			
Eletrificação parcial de veículos leves (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por veículos híbridos <i>flex</i> (HEV <sup>3</sup> ) nas categorias de automóveis e comerciais leves.	36	20	62	Cerca de 900 mil veículos alternativos	50	-25,31	0,59	2,34
Eletrificação total de veículos leves (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por veículos elétricos a bateria (BEV) nas categorias de automóveis e comerciais leves	36	11	100	Cerca de 900 mil veículos alternativos	50	-224,87	1,22	5,45
Ônibus a biometano/GNV <sup>4</sup> (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por ônibus com motores movidos a gás, queimando mistura de GNV e biometano	36	20		N/A	20	576,40	-1,24	2,16
Aumento do uso de biodiesel em ônibus (G2)	Aumento da mistura regulamentada (% em volume) de biodiesel no diesel comercial	27	20	100	N/A	25	72,18	-0,24	3,38
Uso de HVO em ônibus (G3)	Aumento da mistura regulamentada (% em volume) de HVO no diesel comercial	18	20	80	Produção de 180 mil TJ/ano de diesel verde em 2050	30	809,69	-7,67	9,47
Eletrificação total de ônibus (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por ônibus elétricos a bateria	12	20	100	N/A	70	106,84	-0,85	7,95



Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Nota	Limite inferior (%) <sup>1</sup>	Limite superior (%) <sup>1</sup>	Metas do PLAC-MG <sup>1</sup>	Premissa considerada (%) <sup>1</sup>	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )
<b>Transporte de carga</b>									
Aumento do uso de biodiesel em caminhões (G2)	Aumento da mistura regulamentada (% em volume) de biodiesel no diesel comercial	27	20	100	N/A	25	72,08	-1,07	14,82
Uso de HVO em caminhões (G3)	Aumento da mistura regulamentada (% em volume) de HVO no diesel comercial	18	20	80	Produção de 180 mil TJ/ano de diesel verde em 2050	30	807,97	-33,62	41,61
Caminhões a GNV/biometano <sup>4</sup> (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por caminhões com motores movidos a gás, queimando mistura de GNV e biometano	18	13 (considerando todos os portes de caminhões)		N/A	30 (apenas semipesados e pesados)	577,04	-5,80	10,05
Eletrificação total de caminhões (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por caminhões semileves e leves elétricos a bateria. Caminhões alocados para o Transporte Urbano de Carga (TUC)	12	20	75	N/A	50	-801,32	18,20	22,72
Substituição do querosene de aviação por SAF (G3)	Aumento da mistura regulamentada (% em volume) de SAF no querosene de aviação	6	10	90	Produção de 41 mil TJ/ano de QAv verde	20	637,58	-3,15	4,94
Mudança de modal <sup>5</sup> (G4)	Transição do uso do modal rodoviário para o ferroviário (em % de TKU)	N/A	N/A	N/A	30	20 <sup>6</sup>	157,01	-0,78	4,96
Caminhão a hidrogênio (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por caminhões semipesados e pesados a hidrogênio. Caminhões alocados para o transporte regional carga	3	-	-	N/A	10	379,30	-0,45	1,18

Fonte: Elaboração própria.

Notas:

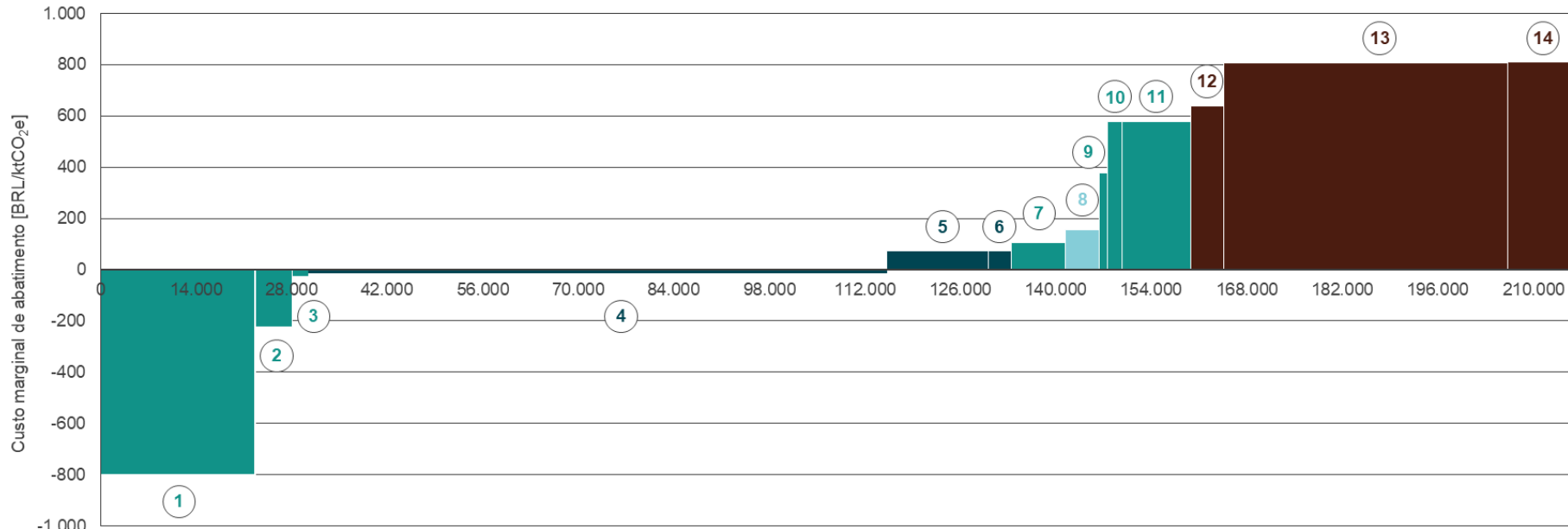
- Os valores apresentados, em sua maioria, correspondem ao ano 2050. As exceções são destacadas com notas de rodapé.
- Referente ao ano de 2040.



3. Carro híbrido convencional que combina um motor de combustão com um motor elétrico potente o suficiente para permitir a condução 100% elétrica durante vários quilômetros.
4. O biometano tem como característica a equivalência ao GNV em termos de adequação ao motor (EIXOS, 2024).
5. Em substituição à tecnologia “Eletrificação de trens de carga”, que apresentou incertezas quanto às ferrovias mais adequadas para sua aplicação e não foi plenamente aceita pelo GT de Transporte dada a baixa intensidade de carbono desse modal, optou-se por abordar essa tecnologia por meio de um box explicativo. Além disso, não foi possível estimar a MACC da tecnologia “Mudança de modal” no transporte de passageiros, devido à indisponibilidade, em tempo hábil, das projeções de RPK futuro pela Secretaria de Estado de Infraestrutura, Mobilidade e Parcerias (SEINFRA). Dessa forma, essa tecnologia foi redirecionada para o transporte de cargas, substituindo a eletrificação de trens de carga.
6. Considerando a meta do PLAC-MG e que já há uma transição do uso do modal rodoviário para o ferroviário no Cenário Base.



Figura 16: Resultados da MACC do setor de transporte



Redução de GEE [ktCO<sub>2</sub>e]

Classificação

- |   |  |    |  |
|---|--|----|--|
| 1 | Eletrificação total de caminhões           | 8  | Mudança de modal                             |
| 2 | Eletrificação total de Veículos Leves      | 9  | Caminhão a hidrogênio                        |
| 3 | Eletrificação parcial de veículos leves    | 10 | Ônibus a biometano/GNV                       |
| 4 | Aumento do uso de etanol em veículos leves | 11 | Caminhões a GNV/Biometano                    |
| 5 | Aumento do uso de biodiesel em caminhões   | 12 | Substituição do querosene de aviação por SAF |
| 6 | Aumento do uso de biodiesel em ônibus      | 13 | Uso de HVO em caminhões                      |
| 7 | Eletrificação total de Ônibus              | 14 | Uso de HVO em ônibus                         |

Grupo 1	Sistemas de propulsão alternativos
Grupo 2	Troca da fonte de energia para biocombustíveis convencionais
Grupo 3	Troca da fonte de energia para biocombustíveis avançados
Grupo 4	Ampliação da infraestrutura de modos de alta capacidade

Fonte: Elaboração própria.



A análise da Tabela 14 e da Figura 16 mostra que a tecnologia “Aumento no uso de etanol em veículos leves” apresenta o maior potencial de mitigação. Esse resultado se deve ao fato de ser uma tecnologia amplamente conhecida, utilizada e incentivada. Para atender às metas do PLAC-MG, nessa primeira rodada de análise, foi considerado o limite superior de aplicação encontrado na literatura, tanto no *market share* do etanol hidratado em comparação à gasolina C quanto no aumento da mistura regulamentada de etanol anidro na gasolina. Como resultado, estima-se uma mitigação acumulada de aproximadamente 84,8 MtCO<sub>2e</sub> entre 2025 e 2050. Além disso, a adoção dessa tecnologia pode gerar uma economia acumulada de 974 milhões de reais no horizonte da análise, com um custo marginal de abatimento de -1,5 R\$/tCO<sub>2e</sub>.

É importante ressaltar que esse desempenho positivo está alinhado à nota atribuída (Tabela 14), consolidando-a como a tecnologia de maior avaliação. No entanto, como foi a primeira medida implementada no Cenário Rota, seu potencial de mitigação esperado foi ampliado. Isso ocorre porque, conforme mencionado anteriormente, a ordem de entrada das tecnologias no cenário afeta diretamente os resultados esperados de mitigação.

A segunda tecnologia com maior potencial de mitigação foi o uso de HVO em caminhões, estimado em aproximadamente 41,6 MtCO<sub>2e</sub>. Isso reflete a relevância do transporte regional de carga, que é o segundo maior responsável pelas emissões no setor de transporte, atrás apenas do transporte individual motorizado. A mitigação esperada está associada a um custo marginal de abatimento de 808 R\$/tCO<sub>2e</sub>, sendo o uso de HVO em caminhões e ônibus as tecnologias com maior custo marginal de abatimento dentre aquelas analisadas, devido ao preço elevado do biocombustível em relação ao diesel, além do fato de já haver biodiesel na mistura regulamentada, reduzindo o potencial de mitigação do HVO.

No mesmo contexto de biocombustíveis avançados (Grupo 3), destaca-se a tecnologia de substituição do querosene de aviação por SAF, que enfrenta desafios relacionados à expectativa de preço, com um custo marginal de abatimento de 638 R\$/tCO<sub>2e</sub>.

Por outro lado, a terceira medida com maior potencial de mitigação acumulado no horizonte de análise é a eletrificação total de caminhões, que envolve uma maior participação de caminhões semileves e leves elétricos a bateria, categorias frequentemente utilizadas no transporte urbano de carga (TUC). Essa medida apresenta um potencial de mitigação acumulado estimado em 22,7 MtCO<sub>2e</sub>. Embora os custos iniciais sejam consideravelmente mais elevados, incluindo investimentos em infraestrutura de carregadores nos centros de distribuição, os caminhões elétricos oferecem uma significativa economia de energia devido à sua maior eficiência em comparação aos caminhões convencionais. Além disso, a expectativa de redução nos custos de manutenção contribui para uma economia acumulada estimada em cerca de 18 bilhões de reais ao longo do horizonte temporal analisado. Com um custo marginal de abatimento de -801 R\$/tCO<sub>2e</sub>, essa tecnologia demonstra um dos menores custos no setor de transporte. Ademais, as tecnologias eletrificação total de veículos leves e a eletrificação parcial de veículos leves também demonstraram ser custo efetivas, com custos



marginais de abatimento de  $-225 \text{ R\$/tCO}_2\text{e}$  e  $-25 \text{ R\$/tCO}_2\text{e}$ , respectivamente. Essa diferença significativa nos custos marginais reflete as distinções em suas estruturas de custo e no potencial de mitigação.

Embora os veículos elétricos a bateria (BEVs, na sigla em inglês) tenham um investimento inicial usualmente maior, sua superior eficiência energética resulta em custos com energia elétrica substancialmente menores ao longo da vida útil em comparação com os HEVs, que ainda consomem combustível líquido. Adicionalmente, os BEVs apresentam custos de manutenção inferiores. A combinação da maior eficiência energética e dos menores custos de manutenção para os BEVs gera economias operacionais totais que, no balanço do cálculo da MACC, superam o maior investimento inicial e resultam em um custo líquido por tonelada de  $\text{CO}_2\text{e}$  abatida significativamente mais baixo, ou seja, um benefício líquido por tonelada de  $\text{CO}_2\text{e}$  abatida maior do que o observado para os HEVs.

No entanto, isso não foi observado para a tecnologia de eletrificação total de ônibus, que apresentou um custo marginal de abatimento de  $107 \text{ R\$/tCO}_2\text{e}$ , pois necessita de um maior investimento em infraestrutura, dada a necessidade de carregadores ultrarrápidos e investimentos em subestações. Assim, pelas estimativas, essa tecnologia tende a ficar mais atrativa a partir de 2035, dada a expectativa de redução de preço das baterias.

Ainda em relação à mobilidade elétrica, ao considerar esse tipo de transição para o seguimento de caminhões semipesados e pesados, utilizados no transporte regional (intermunicipal e interestadual), essa tecnologia enfrenta limitações relacionadas à autonomia, o que requer o uso de carregadores ultrarrápidos nas rodovias estaduais e federais. Diante disso, para esses caminhões de maior porte e com maior quilometragem diária, uma alternativa viável é aumentar a utilização tanto de biocombustíveis convencionais (como o biodiesel) quanto dos avançados (como o HVO), em misturas com o diesel. Também é recomendável considerar o uso de biometano e do hidrogênio como opções complementares.

De maneira geral, as tecnologias de sistema de propulsão alternativas mais custo-efetivas (Grupo 1) foram a eletrificação total de caminhões, a eletrificação total de veículos leves e a eletrificação parcial de veículos leves, pois seu OPEX supera a diferença do CAPEX no horizonte de estudo. Por outro lado, tecnologias como o uso de biometano e GNV em caminhões e ônibus, a eletrificação total de ônibus e o uso de hidrogênio em caminhões mostraram custos marginais de abatimento mais elevados, variando entre  $107 \text{ R\$/tCO}_2\text{e}$  (ônibus elétricos) e  $577 \text{ R\$/tCO}_2\text{e}$  (caminhões a biometano/GNV). Isso se deve ao fato de que, nesse mesmo horizonte de estudo, a redução do OPEX promovida por essas alternativas não supera o CAPEX adicional e, em alguns casos como nos dos caminhões e ônibus movidos a biometano/GNV, o OPEX supera os da tecnologia convencional a diesel considerada no Cenário Base, dado o menor rendimento energético da nova tecnologia em relação à convencional, além do elevado preço do biometano.



Ainda em relação ao Grupo 1, destaca-se que a medida uso de caminhão a hidrogênio não foi a com maior custo marginal de abatimento, pois foi considerada sua aplicação apenas no horizonte de 2041 a 2050. Assim, ao trazer o fluxo de caixa para o valor presente por meio da taxa de desconto utilizada na análise, o valor presente desses desembolsos futuros é significativamente reduzido.

No entanto, essa tecnologia ainda enfrenta desafios consideráveis que elevam seus custos, CAPEX e OPEX, especialmente relacionados à produção e distribuição do hidrogênio de baixo carbono, à baixa eficiência energética na cadeia completa *well-to-wheel*, à falta de economia de escala no mercado atual e às incertezas tecnológicas e regulatórias.

Com relação às tecnologias relativas à troca da fonte de energia para combustíveis e biocombustíveis convencionais (Grupo 2), o etanol se mostrou uma importante medida a ser ampliada, dado seu potencial acumulado de mitigação (84,8 MtCO<sub>2</sub>e) e sua alta relação custo-efetividade (-11,5 R\$/tCO<sub>2</sub>e).

Por outro lado, o biodiesel, também integrante desse grupo embora apresente um potencial relevante de mitigação entre 3,38 (ônibus) e 14,82 MtCO<sub>2</sub>e (caminhão), tem um custo marginal de abatimento mais elevado, cerca de 72 R\$/tCO<sub>2</sub>e, para ambas as aplicações, em função da diferença histórica de preço entre o biodiesel e o diesel mineral.

Avançando para as tecnologias relacionadas à troca da fonte de energia para biocombustíveis avançados (Grupo 3), destaca-se que, de modo geral, elas apresentam custos marginais de abatimento mais elevados, devido à menor maturidade tecnológica e altos custos atuais de produção e distribuição.

O uso de HVO em caminhões apresentou o segundo maior potencial de mitigação dentre todas as avaliadas, estimado em aproximadamente 41,6 MtCO<sub>2</sub>e, refletindo a relevância do transporte regional de carga em Minas Gerais. Entretanto, a mitigação esperada com o uso de HVO, seja em caminhões ou em ônibus, está associada ao maior custo marginal de abatimento dentre todas as tecnologias analisadas no estudo, alcançando 808 R\$/tCO<sub>2</sub>e. Esse custo elevado decorre, principalmente, do elevado preço do HVO em relação ao diesel mineral, sendo 250% mais caro no início do período analisado e ainda 100% mais caro ao fim, mesmo considerando a curva de aprendizado e ganhos de escala. Além disso, a presença obrigatória de biodiesel na mistura com diesel mineral limita o potencial adicional de mitigação que o uso de HVO puro ou em misturas mais altas poderia oferecer, dentro do atual cenário regulatório.

A outra tecnologia avaliada no Grupo 3 é a substituição do querosene de aviação por SAF. Assim como o HVO, o SAF enfrenta desafios significativos relacionados ao seu elevado custo de produção, o que se reflete em seu custo marginal de abatimento de 638 R\$/tCO<sub>2</sub>e. Apesar de apresentar um custo marginal de abatimento inferior ao do HVO, o SAF se posiciona entre as tecnologias de maior custo por tonelada de CO<sub>2</sub>e abatida. Essa diferença é explicada pelo fato de que o querosene de aviação não tem atualmente biocombustíveis em sua mistura.



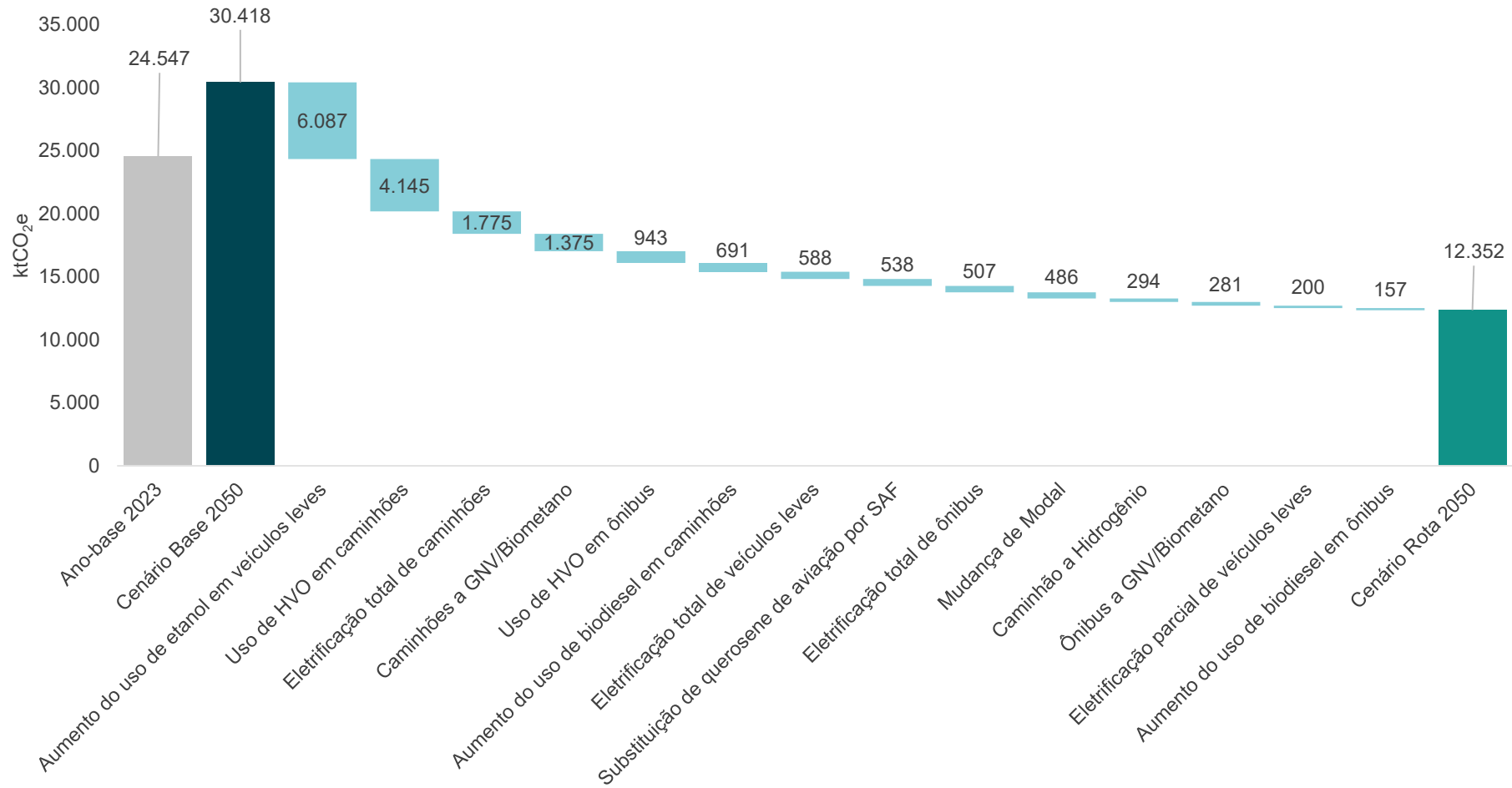
Por fim, o Grupo 4 é composto unicamente pela tecnologia de mudança de modal, que foca a transferência de cargas do modal rodoviário para o ferroviário. Essa medida apresenta um potencial de mitigação de 4,96 MtCO<sub>2</sub>e, com um custo marginal de abatimento de 157 R\$/tCO<sub>2</sub>e, indicando um custo líquido associado à mitigação de GEE ao longo do horizonte analisado. Esse custo relativamente elevado se deve principalmente ao substancial CAPEX necessário para a implantação e/ou ampliação da malha ferroviária do estado. Tal investimento não é totalmente compensado pela redução do OPEX decorrente, por exemplo, da menor circulação de caminhões ao longo do horizonte de estudo considerado para a análise da MACC.

É crucial notar, contudo, que o cálculo do custo marginal de abatimento foca a relação entre custo financeiro e redução das emissões de GEE, não contemplando outros aspectos importantes e benefícios estratégicos relacionados à infraestrutura ferroviária. Entre esses benefícios, destacam-se o ganho de competitividade e atratividade para o estado de Minas Gerais, a redução significativa do custo logístico para a economia e as empresas, além de potenciais melhorias em segurança viária e a diminuição do desgaste da malha rodoviária. Portanto, embora o custo marginal de abatimento seja um fator a ser considerado, uma avaliação abrangente das tecnologias abordadas neste estudo pode desencadear estudos complementares que levem em conta impactos socioeconômicos e logísticos mais amplos, contribuindo para uma tomada de decisão ainda mais estratégica.

Além disso, é fundamental compreender a natureza sequencial da análise da MACC: a aplicação de uma tecnologia que reduza as emissões altera o cenário de mitigação para as medidas subsequentes. Assim, a ordem em que as tecnologias são consideradas (ou modeladas como sendo implementadas) influencia diretamente tanto o potencial de abatimento remanescente quanto a relação custo-benefício das opções posteriores. Consequentemente, estudos que adotem diferentes sequências de implementação podem apresentar curva MAC e estimativas de mitigação distintas. A partir do cálculo da redução de emissões das tecnologias avaliadas, conforme detalhado na Tabela 14, foi possível estimar o Cenário Rota e o potencial com que cada tecnologia contribui para a redução de emissão até 2050, conforme pode ser observado na Figura 17.



Figura 17: Estimativa das emissões para o fim do horizonte no Cenário Rota

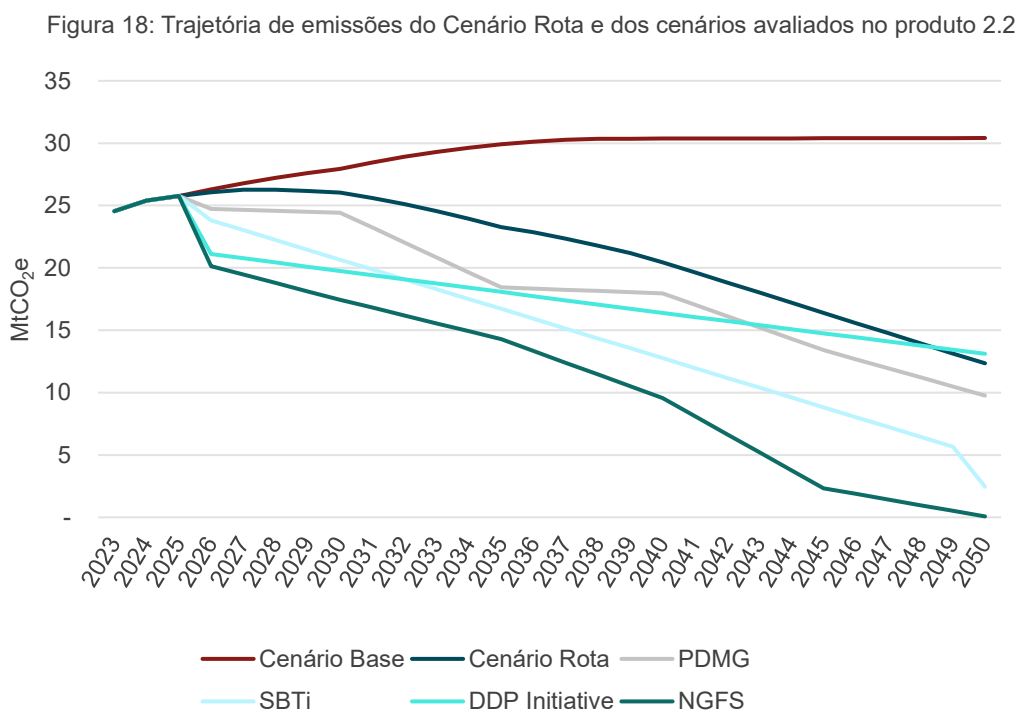


Fonte: Elaboração própria.



## Avaliação dos Cenários Base, Net Zero e Rota

A partir do resultado do Cenário Base, foi possível avaliar os esforços necessários em termos de redução de emissões para o atingimento dos cenários *Net Zero*. Os resultados do Cenário Rota mostraram que as tecnologias auxiliam na aproximação da trajetória de emissões do estado a alguns dos cenários avaliados. Porém, ainda existe um distanciamento do Cenário Rota em relação aos cenários mais ambiciosos. A Figura 18 apresenta a trajetória de emissões do setor de transporte estimada para todos os cenários analisados neste estudo.



Fonte: Elaboração própria.

Enquanto o Cenário Base projeta um aumento de cerca de 24% nas emissões em relação ao ano-base de 2023, o Cenário Rota demonstra um esforço de mitigação próprio, resultando em uma redução de aproximadamente 50%, no mesmo período, e uma redução de cerca de 59% nas emissões de 2050 quando comparado diretamente ao Cenário Base.

No entanto, ao comparar o Cenário Rota com cenários de referência *Net Zero*, a situação se apresenta diferente. Embora sua trajetória em 2050 seja muito próxima à do Cenário *Net Zero* da DDP *Initiative*, com mitigação superior em cerca de 6%, as emissões projetadas no Cenário Rota permanecem significativamente mais altas do que aquelas estimadas em outros *benchmarks* avaliados. Por exemplo, as emissões são cerca de 27% superiores às do Cenário *Net Zero* do PDMG em 2050. Essa diferença pode ser atribuída a algumas distinções metodológicas e de premissas entre os estudos. Uma diferença importante reside na abordagem das medidas de mudança modal no transporte de passageiros: enquanto o PDMG



considerou iniciativas como incentivo ao BRT, ampliação de linhas prioritárias, sistemas ferroviários e modais compartilhados, além da expansão de ciclovias e infraestrutura para micromobilidade, o Cenário Rota não quantificou de forma explícita o deslocamento de usuários do transporte individual motorizado para essas modalidades no cálculo do potencial de mitigação.

Essa escolha metodológica no Cenário Rota reflete a considerável incerteza e subjetividade envolvidas na estimativa de quantos usuários, de fato, deixariam de utilizar o transporte individual motorizado em favor de outras modalidades de transporte coletivo. Por essa razão, o Cenário Rota adotou uma abordagem mais conservadora nesse aspecto, priorizando a modelagem da mudança modal principalmente no transporte de cargas. No entanto, é importante ressaltar que as tecnologias propostas para o transporte público no Cenário Rota têm o potencial para estimular uma migração significativa de usuários do transporte individual para o coletivo. Isso significa que, na prática, o potencial de mitigação do Cenário Rota poderá ser superior ao projetado, aproximando seu desempenho ao observado no PDMG nesse aspecto.

Além disso, as premissas macroeconômicas utilizadas para projetar o Cenário Rota resultaram em um nível de atividade de transportes superior ao projetado no PDMG para 2050. Consequentemente, o Cenário Rota parte de uma linha de base de emissões que é intrinsecamente maior, o que naturalmente contribui para um nível de emissões finais também superior ao do PDMG em 2050.

Por fim, a discrepância entre as emissões do Cenário Rota e os Cenários *Net Zero* torna-se ainda mais expressiva nos cenários mais ambiciosos ou restritivos. Nesses cenários, as emissões são reduzidas a níveis próximos de zero, fundamentalmente pela eliminação do uso de combustíveis fósseis em praticamente todos os segmentos de transportes. Nessa comparação, o Cenário Rota apresenta emissões cerca de cinco vezes superiores às do Cenário *Net Zero* baseado no método de contração absoluta da SBTi e cerca de 170 vezes (12,35 MtCO<sub>2</sub>e *versus* 0,07 MtCO<sub>2</sub>e) maior que o Cenário *Net Zero* do NGFS.

Novamente, destaca-se que o objetivo deste estudo não é atingir completamente os marcos de redução de emissões previstos nos cenários *Net Zero* avaliados, mas sim utilizá-los como orientadores para possíveis metas, dado que os cenários não refletem necessariamente a realidade atual do estado. Assim, o Cenário Rota avaliou as tecnologias de descarbonização apresentadas no P2.1 de forma a alcançar o *Net Zero* no estado, priorizando tecnologias custo efetivas e aderentes às características de Minas Gerais.



## CONCLUSÃO

Com base nas análises descritas neste relatório, foi possível elaborar uma projeção para as emissões do setor de transporte de Minas Gerais considerando diferentes cenários. O Cenário Base foi calculado a partir de metodologia *bottom-up* ou *top-down*, conforme a disponibilidade de dados. As premissas de crescimento utilizadas foram, principalmente, o crescimento populacional, variável mais aderente nas análises estatísticas. Porém, para o modal aéreo, foi utilizado o PIB em razão do melhor ajuste. Os resultados mostram que, na ausência de medidas de descarbonização, as emissões de GEE do setor aumentam em 24% em 2050, se comparadas ao ano-base 2023.

Nesse sentido, a avaliação de cenários climáticos permitiu demonstrar o desafio a ser enfrentado pelo setor de transporte para se adequar às trajetórias *Net Zero*, na ambição de limitar o aquecimento global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. Foi possível observar que, enquanto no Cenário Base as emissões apresentavam um crescimento, os Cenários *Net Zero* indicam que é necessária uma redução entre 47% e 100% das emissões em 2050, em relação a 2023.

Com base nas análises realizadas ao longo deste relatório, foi possível estimar a curva MAC para a maior parte das tecnologias de descarbonização apresentadas no P2.1 para o setor de transporte de Minas Gerais. A partir do cálculo das emissões evitadas pelas tecnologias avaliadas, foi elaborado o Cenário Rota, o qual foi comparado ao Cenário Base e a outros cenários climáticos de relevância nacional e internacional.

Por meio do método proposto, foram calculados o potencial de mitigação de emissões, o VPL e o custo marginal de abatimento para cada tecnologia. Esses indicadores permitiram identificar as alternativas mais promissoras e atrativas para o estado de Minas Gerais. O detalhamento técnico de cada tecnologia encontra-se nas fichas apresentadas no anexo deste relatório, abrangendo as premissas técnicas, o horizonte de análise, os dados de redução anual de GEE e o fluxo de caixa associado.

Ao analisar a trajetória de emissões do Cenário Rota, constata-se um comportamento oposto ao observado no Cenário Base. Enquanto o Cenário Base projeta um aumento de aproximadamente 24% nas emissões em relação ao ano de 2023, o Cenário Rota apresenta uma redução de cerca de 50%. Em uma análise mais detalhada das emissões estimadas para 2050, verifica-se que o Cenário Rota proporciona uma redução significativa de aproximadamente 59% em relação ao Cenário Base.

Contudo, o Cenário Rota apresenta emissões superiores em comparação a outros cenários de baixa emissão avaliados. Em 2050, as emissões projetadas no Cenário Rota são muito próximas a do Cenário DDS da DDP *Initiative*, com uma diferença de cerca de 6%, sendo a



trajetória de emissões menor para o Cenário Rota. No entanto, as emissões do Cenário Rota são 27% superiores às observadas no Cenário *Net Zero* do PDMG.

Vale ressaltar que o objetivo deste estudo não é alcançar totalmente os marcos de redução de emissões previstos nos Cenários *Net Zero*, mas sim utilizá-los como guias para metas futuras, considerando que os cenários podem não refletir a realidade atual do estado.



# CENÁRIOS CONSOLIDADOS

## Cenário Base

### Metodologia e premissas

O Cenário Base consolidado foi calculado a partir dos cenários setoriais, obtidos por meio de metodologias e premissas específicas.

De forma geral, o setor de transporte utilizou tanto a metodologia *bottom-up*, para o cálculo das emissões do modal rodoviário, quanto a metodologia *top-down*, para o cálculo das emissões do modal ferroviário e aéreo. Para o modal rodoviário, a principal premissa utilizada foi o histórico de venda de veículos, que foi correlacionado ao histórico de população, para projetar a frota ao longo dos anos. Além disso, foram utilizadas as curvas de sucateamento, distância média percorrida e eficiência energética. No caso do modal ferroviário, a projeção baseou-se nos dados de Tonelada-Quilômetro Útil (TKU) e de Passageiro-Quilômetro (pkm) por ferrovia, também correlacionados ao histórico de população. Por fim, as emissões do modal aéreo foram calculadas com base no histórico de consumo de combustível do setor, correlacionado ao histórico do PIB estadual.

Para o setor de indústria, a projeção das emissões foi realizada por meio da metodologia *bottom-up*, aplicada a todos os subsetores. Para isso, a modelagem segmentou os subsetores que são responsáveis pela maior parte das emissões e/ou que tenham uma elevada participação na atividade econômica do setor industrial no estado. Dessa forma, foram definidos três segmentos principais: ferro-gusa e aço; cimento e cal; e as demais indústrias foram agregadas sob categoria “demais segmentos industriais”. Cada um desses segmentos foi caracterizado com base em parâmetros técnicos relevantes para a estimativa de emissões, como o consumo de energia, a eficiência energética, a intensidade de emissão de produtos e as principais rotas tecnológicas. Com essa estrutura definida, os parâmetros foram projetados em função do nível de atividade de cada um dos segmentos., seja em termos de volume de produção (por exemplo, tonelada de aço), seja em Valor Bruto da Produção do segmento. Por fim, foram estimados o consumo de energia e as emissões dos processos até o ano de 2050.

Para o setor de AFOLU, as projeções também foram realizadas considerando diferentes subsetores e por meio da metodologia *bottom-up*. No subsetor de agricultura, foram utilizados dados referentes ao histórico de produção, produtividade e área ocupada para projeção das emissões futuras. Para o subsetor pecuária, a projeção de rebanho, em número de cabeças, foi calculada por meio do modelo SARIMA, com base em dados históricos, e utilizada nos cálculos das emissões de GEE. Já para o subsetor uso e mudança de uso da terra, os dados espaciais projetados de uso e cobertura do solo serviram de base para estimar tanto as emissões quanto as remoções de GEE.

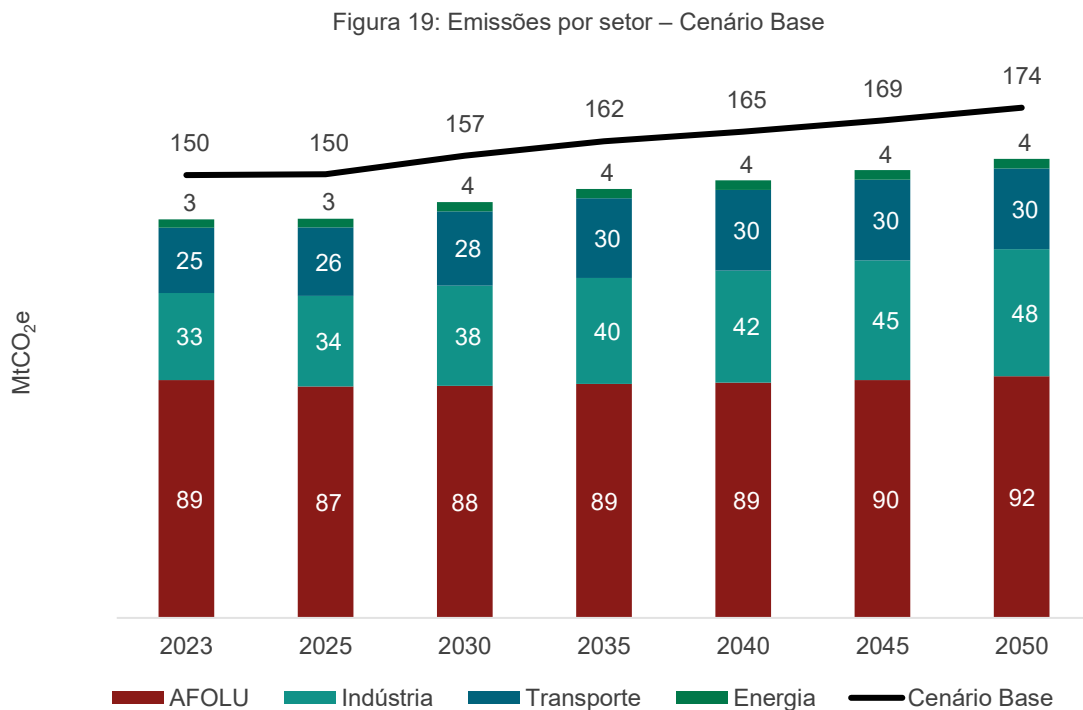


No caso do setor de energia, as emissões foram calculadas a partir da metodologia *top-down*. Para o subsetor de eletricidade, as emissões foram calculadas com base no histórico da geração por fonte e nas projeções de crescimento da geração realizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela Agência Internacional de Energia (IEA). Já para os subsetores de refino e biocombustíveis, a projeção das emissões foi realizada correlacionando os dados históricos de produção de combustíveis e biocombustíveis ao PIB, permitindo estimativa até 2050. Esses resultados foram posteriormente ajustados de acordo com os dados projetados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e pela IEA, e calibrados também com a capacidade de produção das unidades.

As metodologias adotadas estão descritas em detalhe na seção “Metodologia aplicada e resultados” dos relatórios setoriais.

## Resultados

O Cenário Base mostra que, na ausência da implementação de novas tecnologias, as emissões do estado tendem a aumentar 16% até 2050, em relação ao ano-base 2023. Esse aumento ocorre de forma distinta entre os setores, refletindo as metodologias específicas aplicadas a cada um deles. Todavia, o padrão geral das emissões do estado não muda significativamente, com o setor de AFOLU permanecendo como o principal emissor em 2050. A Figura 19 apresenta a distribuição das emissões por setor.



No setor de transporte, nota-se que, na ausência de novas medidas de mitigação de emissões de GEE, as emissões tendem a crescer ao longo dos anos, impulsionadas pelo crescimento populacional e da atividade econômica, que aumentam a demanda por transportes. Assim, o aumento das emissões em 2050 em relação ao ano-base (2023) chega a 24%, sendo cerca de 66% das emissões relacionadas à queima do diesel, e 31%, à queima da gasolina. O modal rodoviário segue como o principal responsável pelas emissões, representando 90% das emissões do setor e apresentando um crescimento de 22% em relação ao ano-base. Embora os modais aéreo e ferroviário apresentem menor participação no total de emissões, registraram aumentos expressivos de 142% e 30%, respectivamente.

As emissões do setor de indústria tiveram um aumento de 46% no período de 2023 e 2050, fruto do aumento do PIB e consequente aumento da atividade na indústria de Minas Gerais. Entre os segmentos industriais analisados, destaca-se a indústria do cimento e cal, que apresentou o maior crescimento relativo nas emissões, com um aumento de 49% no período. O setor de ferro-gusa e aço, por sua vez, apresentou um crescimento de 45% das emissões, configurando-se como o segundo maior aumento entre os subsetores industriais avaliados. Além disso, este segmento permanece como aquele que possui maior nível de emissões dentro da indústria, entre o período analisado.

No setor de AFOLU, as emissões líquidas<sup>15</sup> cresceram 2,45% até 2050, quando comparadas ao ano-base 2023. Esse crescimento não foi tão acentuado devido à contribuição significativa de remoções do subsetor de LULUCF, que representam aproximadamente 22 MtCO<sub>2</sub>e, frente aos 114 MtCO<sub>2</sub>e de emissões brutas do setor em 2050. Em virtude da projeção do crescimento de suas atividades ao longo do tempo, os subsetores de agricultura e pecuária apresentaram crescimento das emissões líquidas até 2050, cerca de 32,3% e 14,4%, respectivamente, quando comparadas aos valores observados no ano-base 2023.

No setor de energia, as emissões apresentaram um aumento de 15% até 2050 em relação a 2023. Esse crescimento é mais acentuado entre 2023 e 2030, impulsionado principalmente pela expansão das atividades de refino no estado. O subsetor de biocombustíveis registra o maior aumento relativo das emissões. Em 2050, devido ao aumento da produção de etanol e biodiesel, as emissões quase dobram em relação a 2023, passando de 0,23 MtCO<sub>2</sub>e para 0,43 MtCO<sub>2</sub>e. As emissões relacionadas à geração de eletricidade no estado, por sua vez, apresentam um aumento expressivo, devido ao crescimento da geração termelétrica.

---

<sup>15</sup> Emissões líquidas indicam o saldo entre as emissões e as remoções de GEE. Quando as remoções superam as emissões o saldo é negativo.



## Cenário Rota

### Metodologia e premissas

A partir dos resultados segregados do Cenário Rota para os quatro setores que compõem o projeto, iniciaram-se as rodadas de calibração intersetoriais. Nessas rodadas, cada setor ajustou a aplicação das tecnologias, considerando os níveis de adoção disponíveis na literatura, os parâmetros definidos por marcos regulatórios, ou valores considerados adequados com base na *expertise* técnica.

As tecnologias foram avaliadas a partir da curva MAC. Para cada uma delas foi calculado o fluxo de caixa, a partir da soma de CAPEX, OPEX e eventuais receitas geradas ao longo do período de análise. Os valores do fluxo de caixa são trazidos a valor presente com a aplicação da taxa de desconto, resultando no VPL. Além disso, também foi avaliado o potencial de redução de emissão das tecnologias. Os resultados de VPL e potencial de redução foram utilizados no cálculo do custo marginal de abatimento, que permitiu elencar todas as tecnologias avaliadas no Cenário Rota em termos de custo-efetividade.

Em cada rodada de calibração, esses valores eram recalculados, sendo possível avaliar o déficit para o atingimento do *Net Zero*. A cada nova rodada, os setores priorizavam as tecnologias mais custo efetivas, ampliando sua aplicação com o objetivo de maximizar os resultados.

Nesse exercício, também foi observado como os setores se interligavam em termos de oferta e demanda de matéria-prima e energia. Para isso, o setor de energia ficou responsável por consolidar as demandas de combustível e eletricidade dos demais setores, avaliando, em seguida, a viabilidade de suprimento a partir das diferentes tecnologias disponíveis. Além disso, considerou-se a possibilidade do fornecimento de matéria-prima oriunda do setor de AFOLU para a produção de biocombustíveis. É importante destacar que este estudo adotou uma abordagem de sistema aberto para Minas Gerais. Isso significa que, caso o estado não consiga gerar todo o biocombustível necessário para suprir a demanda dos setores, isso não representará uma limitação para a adoção da tecnologia, já que a oferta poderia vir de outros estados. Da mesma forma, caso a oferta de uma determinada fonte de energia seja maior do que a demanda interna, essa fonte poderia ser utilizada por outros estados, contribuindo para a descarbonização em âmbito nacional.

### Resultados

Apesar dos esforços nas aplicações das tecnologias, ao fim do período, o Cenário Rota resulta em uma emissão residual de 36,8 MtCO<sub>2</sub>e, o que impede o cumprimento do compromisso *Race to Zero* aderido pelo estado. Embora a meta *Net Zero* não tenha sido alcançada, o Cenário Rota projeta para 2050 uma redução significativa de 75% em relação ao ano-base



2023, em contraste com o Cenário Base, que aponta um aumento de 16% no mesmo período. A contribuição para a redução das emissões variou entre os setores de acordo com a disponibilidade das tecnologias.

O setor de energia apresentou o maior potencial de redução líquida ao fim do período, registrando emissões líquidas 722% menores em relação ao ano-base 2023. Embora seja o setor menos intensivo em emissões, destaca-se pelo elevado potencial de remoção de emissões, especialmente por meio de tecnologias de captura de carbono aplicadas à produção de biocombustíveis. Em 2050, o setor atinge cerca de  $-20 \text{ MtCO}_2\text{e}$  em emissões líquidas, contribuindo de maneira significativa para o atingimento do resultado.

A produção de bioenergia com captura de carbono (BECCS) é atualmente a única tecnologia de remoção de dióxido de carbono que também permite a geração de energia. Ao longo do ciclo de vida da biomassa, as plantas absorvem o  $\text{CO}_2$  da atmosfera durante o crescimento, e a tecnologia de BECCS assegura que esse carbono não seja liberado novamente durante o processo de conversão da biomassa em energia (FAJARDY; GREENFIELD, 2024). Essa tecnologia é uma ação conjunta entre os setores de AFOLU (plantio/replanteio) e energia (instalação dos equipamentos). Nesse sentido, regiões com forte vocação para bioenergia, como Minas Gerais, destacando-se pelo seu expressivo setor sucroenergético, apresentam alto potencial para a implementação de projetos de BECCS. Trata-se de uma tecnologia amplamente promovida em diversos planos globais de descarbonização, como o *Roadmap* para o *Net Zero* global do setor de energia (IEA, 2021).

Além do setor de energia, o setor de AFOLU incorpora tecnologias com mecanismos diretos de remoção de emissões. Entretanto, o balanço entre as reduções de emissões e as remoções não é suficiente para atingir as emissões líquidas zero, resultando em um saldo positivo ao fim do período. No entanto, o setor apresentou uma redução expressiva de 79,6% nas emissões líquidas em comparação ao ano-base de 2023.

O setor de transporte não possui mecanismos diretos de remoção de emissões. No entanto, algumas tecnologias aplicadas no Cenário Rota envolvem o uso de biocombustíveis, que podem contribuir indiretamente para a redução de emissões. Caso a produção desses biocombustíveis esteja associada ao uso de BECCS, há uma contribuição indireta para a remoção de emissões, que são capturadas no setor de energia. De toda forma, as tecnologias aplicadas no Cenário Rota possibilitam uma redução de 50% das emissões do setor de transporte.

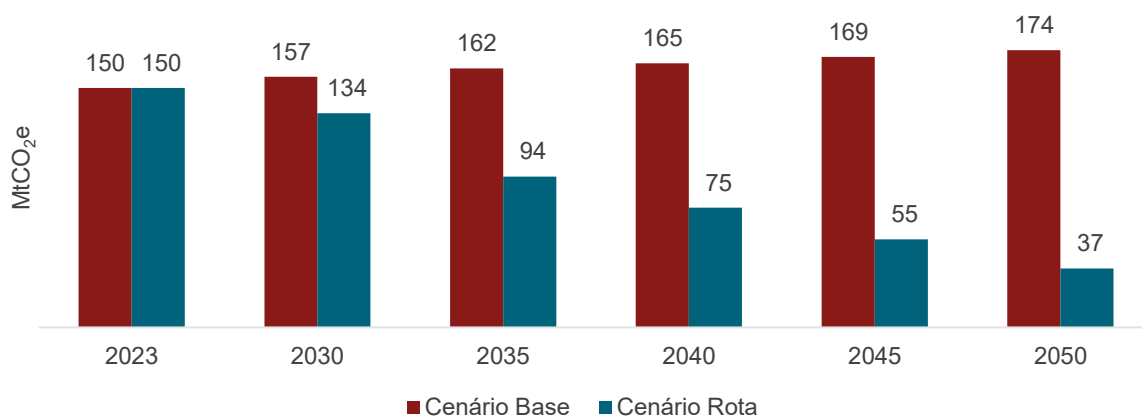
Por fim, o setor de indústria apresenta uma redução de emissões menos expressiva em comparação com os demais setores, atingindo 21% em relação ao ano-base. Isso se deve a alguns fatores característicos do setor: primeiramente, a indústria brasileira tem um alto nível de renovabilidade na matriz energética quando comparada a outros países; em segundo lugar, os investimentos iniciais necessários à readequação das plantas industriais são elevados,



dificultando o atingimento de reduções mais robustas; por fim, há uma diversidade de processos produtivos, que demandam soluções complexas para a descarbonização.

A Figura 20 apresenta as emissões do Cenário Base e Cenário Rota.

Figura 20: Emissões totais – Cenários Base e Rota



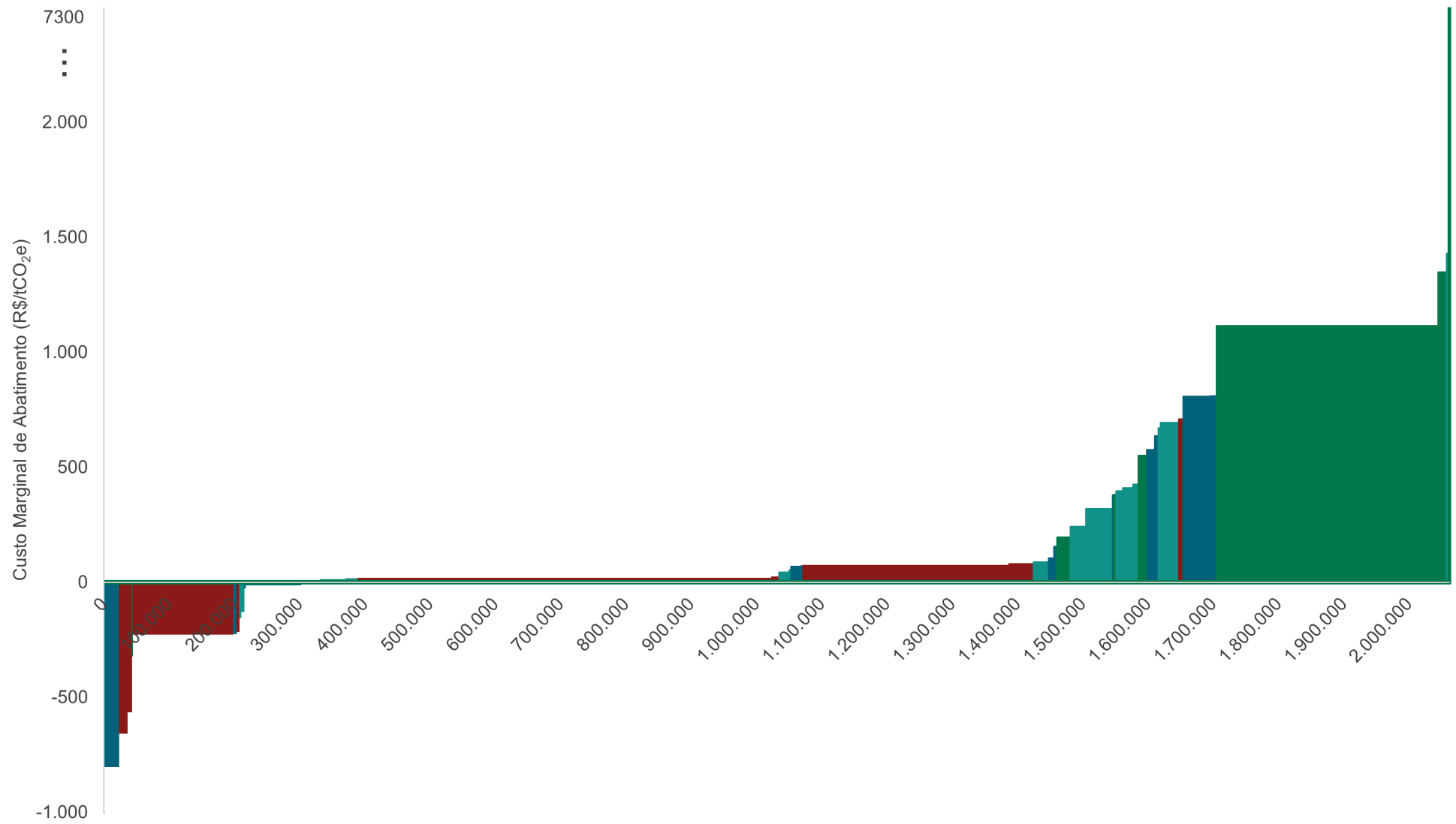
Fonte: Elaboração própria.

Todos os setores avaliaram a custo-efetividade das tecnologias propostas por meio da MACC. A soma dos VPLs de todas as tecnologias consideradas na MACC indica que o custo de atingimento do Cenário Rota é de 512 bilhões de reais, uma média de 20 bilhões de reais por ano a partir de 2026.

A Figura 21 apresenta o resultado consolidado da MACC. Nota-se que todos os setores possuem tecnologias com custos marginais de abatimento positivos e negativos. No setor de energia, apenas uma tecnologia apresentou custo marginal de abatimento negativo e, de um modo geral, o setor apresenta os custos mais elevados. As tecnologias propostas para esse setor estão, em sua maioria, associadas à introdução de novos equipamentos na fronteira tecnológica, como captura de carbono e plantas de biometano. Apesar do custo elevado, o setor demonstra um potencial expressivo de abatimento de emissões, apresentando remoções de CO<sub>2</sub> como resultado.



Figura 21: Curva MAC – Cenário Rota



**INVEST  
MINAS**

**WAY**CARBON

- Indústria: eficiência energética – química
- AFOLU: melhoramento genético de bovinos
- Transporte: eletrificação total de veículos leves
- Indústria: eficiência energética – cimento
- Energia: medidas de eficiência
- AFOLU: uso agrícola de biocarvão
- Indústria: eficiência energética – ferro-gusa e aço
- AFOLU: floresta plantada
- Transporte: aumento do uso de biodiesel em caminhões
- AFOLU: recuperação de pastagens
- Transporte: eletrificação total de ônibus
- Indústria: carvão vegetal – ferro-gusa e aço
- Energia: CCS
- Indústria: substituição de combustíveis fósseis – mineração
- Transporte: caminhões a GNV/biometano
- Indústria: redução direta a gás natural – ferro-gusa e aço
- Transporte: uso de HVO em ônibus
- Indústria: CCS – cimento
- Transporte: eletrificação total de caminhões
- Energia: cogeração biodiesel
- AFOLU: Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN)
- Transporte: eletrificação parcial de veículos leves
- AFOLU: manejo de resíduos agropecuários com biodigestores
- AFOLU: manejo adequado de fertilizantes nitrogenados
- AFOLU: manejo nutricional de bovinos
- Indústria: substituição de combustíveis fósseis – cimento
- Transporte: aumento do uso de biodiesel em ônibus
- Indústria: EAF – ferro-gusa e aço
- Transporte: mudança de modal
- Indústria: substituição de combustíveis fósseis – outras indústrias
- Indústria: CCS – ferro-gusa e aço
- Energia: bioCCS Biometano
- Transporte: substituição do querosene de aviação por SAF
- AFOLU: aditivos alimentares
- Energia: bioCCS etanol
- Energia: baterias
- AFOLU: Sistema Plantio Direto (SPD)
- AFOLU: sistemas integrados ILP e ILPF
- Indústria: eficiência energética – mineração
- Transporte: aumento no uso de etanol em veículos leves
- AFOLU: redução do desmatamento ilegal
- Indústria: aditivo ao clínquer – cimento
- Indústria: substituição de combustíveis fósseis – ferroligas
- Indústria: eficiência energética – outras indústrias
- AFOLU: restauração florestal
- Indústria: eficiência energética – ferroligas
- Energia: biometano
- Transporte: caminhão a hidrogênio
- Indústria: redução direta a H2 – ferro-gusa e aço
- Transporte: ônibus a GNV/biometano
- Indústria: substituição de combustíveis fósseis – química
- Transporte: uso de HVO em caminhões
- Energia: gás natural
- Energia: usinas reversíveis

Fonte: Elaboração própria.



# Cenário Rota+

## Metodologia e premissas

Considerando que as premissas utilizadas no Cenário Rota não foram suficientes para o atingimento da meta *Net Zero*, foram avaliados esforços adicionais voltados à intensificação da redução e remoção de emissões. Para isso, foi realizada uma nova rodada de calibração intersetorial, adotando níveis de aplicação mais ambiciosos do que aqueles utilizados em outros estudos ou adicionais aos planos regulatórios. Esse exercício resultou no Cenário Rota+. Ressalta-se que, exceto pela tecnologia CCS no subsetor intitulado “outras indústrias”, o Cenário Rota+ não incluiu tecnologias diferentes daquelas do Cenário Rota. Além disso, as tecnologias que não puderam ser anteriormente incluídas na MACC devido à escassez de dados também não foram incluídas no Cenário Rota+.

As seções a seguir apresentam os esforços adicionais por cada setor para a construção desse cenário voltado à neutralidade climática.

### Setor de transporte

No setor de transporte, o aumento da aplicação das tecnologias ocorreu em três dos quatro grupos:

1. sistemas de propulsão alternativos;
2. troca da fonte de energia para combustíveis convencionais alternativos e biocombustíveis convencionais;
3. troca da fonte de energia para biocombustíveis avançados.

No caso dos veículos leves, o Cenário Rota já considerava uma aplicação expressiva para o consumo de etanol hidratado, atingindo 80% do consumo em veículos leves e comerciais leves ciclo Otto. Para o Cenário Rota+, foi considerado um aumento dessa participação, para 90% - Os 10% restantes correspondem ao consumo de gasolina em veículos importados que não dispõem da tecnologia *flex*. A mistura de etanol anidro na gasolina não foi alterada, visto que já representava o limite regulatório.

Assim como no Cenário Rota, o Cenário Rota+ considera um encerramento das vendas de veículos leves a combustão em 2045, de modo que até 2050 a frota seja composta majoritariamente por veículos eletrificados. A diferença entre os dois cenários está na participação dos Veículos Híbridos (HEVs, na sigla em inglês) e Veículos Elétricos a Bateria (BEVs, na sigla em inglês). Enquanto no Cenário Rota a participação desses veículos ao fim do período é a mesma (50%), no Cenário Rota+, além do licenciamento mais acelerado, os veículos BEVs, que não geram emissões no uso, ganham maior participação, chegando a 60% em 2050, enquanto os HEVs correspondem a 40%.



Com relação aos veículos que utilizam diesel, o Cenário Rota previa um aumento na participação do biodiesel alinhado aos limites superiores da regulamentação do programa Combustível do Futuro, atingindo 25% da composição do combustível. Ademais, considerava-se uma participação de 30% de *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO). No Cenário Rota+, a participação do biodiesel foi mantida seguindo a regulamentação, enquanto a participação do HVO foi ampliada, chegando em 50%. O aumento do HVO é facilitado devido à sua semelhança estrutural (hidrocarbonetos) em relação ao combustível fóssil, o que permite seu uso sem perdas de eficiência ou necessidade de ajustes nos motores. Entretanto, existe um desafio de disponibilidade desses biocombustíveis, que precisará ser superado para viabilizar o atingimento do *Net Zero*.

Ademais da substituição de combustíveis, o Cenário Rota+ revisou a participação de sistemas de propulsão alternativos para os veículos pesados, com vistas para o atingimento do *Net Zero*. Nesse contexto, é necessário que, até 2050, a frota não conte mais com veículos ciclo diesel. Para os ônibus, há um aumento na participação de modelos elétricos e movidos a Gás Natural Veicular (GNV)/biometano em comparação ao Cenário Rota. No caso de caminhões, adicionalmente a essas duas tecnologias, a rota com hidrogênio apresenta um aumento da participação. Especificamente para os veículos movidos a GNV/biometano, além do aumento da frota com essa tecnologia, houve um aumento da participação do biometano na composição do combustível, chegando a 100% no fim do período.

Cabe ressaltar que, ademais dessas tecnologias que já estão consolidadas para terem seus custos e reduções calculados, existem tecnologias disruptivas, conforme descritas na seção “Tecnologias não incluídas na MACC”. Elas podem auxiliar no atingimento do *Net Zero* e devem ser monitoradas, com sua evolução sendo avaliada ao longo do tempo.

## Setor de indústria

No Cenário Base, a indústria de Minas Gerais representa, aproximadamente, 20% das emissões de GEE, ficando atrás de AFOLU, que concentra cerca de metade das emissões do estado. Apesar de responder por uma parcela menor, o setor industrial enfrenta um grande desafio de reduzir suas emissões e alcançar a meta *Net Zero*. Isso se deve a uma elevada participação da renovabilidade na matriz energética, aos elevados investimentos necessários à readequação das plantas e à diversidade de produtos e processos que caracterizam o setor industrial, os quais demandam soluções complexas para mitigar suas emissões de GEE.

No Cenário Rota, as tecnologias de mitigação concentraram-se no uso de eficiência energética, substituição de combustíveis e inserção de tecnologias ainda em desenvolvimento, como o hidrogênio na fabricação de aço e a captura de carbono. Esse conjunto de medidas permitiu uma redução de 21% em relação ao ano-base e 46% em relação ao Cenário Base. No entanto, para o atingimento do *Net Zero* até 2050, o setor necessita de esforços adicionais para atingir esse objetivo.



Nesse sentido, o Cenário Rota+ intensificou a aplicação das tecnologias com alto potencial de mitigação e espaço para crescimento, contribuindo para uma redução adicional de 17 MtCO<sub>2</sub>e em 2050, o que resultou na descarbonização do setor em um nível de 73% em relação ao ano-base 2023.

No Cenário Rota+, a tecnologia de hidrogênio assumiu um papel mais relevante. Enquanto no Cenário Rota a redução direta com hidrogênio foi responsável por mitigar 16 MtCO<sub>2</sub>e no período, no cenário mais ambicioso, esse valor foi ampliado para 55 MtCO<sub>2</sub>e, cerca de 3 vezes maior. O uso de captura de carbono (CCS, na sigla em inglês) também teve um papel relevante, contribuindo com o abatimento de 61 MtCO<sub>2</sub>e no Cenário Rota+, um valor 4 vezes maior do que foi estimado no Cenário Rota. Além dessas medidas, a substituição de combustíveis foi ampliada nos demais segmentos industriais, refletindo o esforço adicional para que o setor contribua de forma efetiva para o atingimento do *Net Zero*, no âmbito do compromisso *Race to Zero*.

Esse esforço adicional amplia os desafios que a indústria de Minas Gerais deverá enfrentar. Em primeiro lugar, os investimentos necessários serão mais elevados, uma vez que o setor passará a depender mais de tecnologias com alto custo, como a redução direta com hidrogênio (411 R\$/tCO<sub>2</sub>e) e CCS (que varia entre 281,31 e 1.891 R\$/tCO<sub>2</sub>e, dependendo do subsetor). Ademais dos investimentos diretos nas tecnologias, ambas requerem uma infraestrutura de transporte complexa que deverá ser desenvolvida para viabilizar seu uso pelo setor. De igual modo, é importante destacar que essas são tecnologias ainda estão em processo de desenvolvimento, o que destaca o papel central de investimento em pesquisa para torná-las viáveis e disponíveis para o setor atingir seus compromissos climáticos.

## Setor de AFOLU

Ao observar o ano-base 2023, nota-se que o setor de AFOLU, responsável por cerca de 60% das emissões de GEE de Minas Gerais, apresenta também grandes oportunidades de mitigação no contexto do compromisso *Race to Zero*. AFOLU é o único setor capaz de promover remoções de origem biogênica, por meio de alterações no manejo da produção agrícola e pecuária, bem como pelo incremento de áreas de vegetação nativa e de silvicultura, o que contribui para a redução nas emissões líquidas.

Uma das principais premissas do Cenário Rota para o setor de AFOLU foi partir do planejamento setorial estadual, o Plano ABC+ MG (MINAS GERAIS, 2022), e da legislação ambiental vigente, incluindo o Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012), a Lei da Mata Atlântica (BRASIL, 2006), o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Bioma Cerrado (PPCerrado) (BRASIL, 2010), entre outros, para aplicação das tecnologias dentro do horizonte necessário (2025-2050). Entretanto, ao fim do período, o setor de AFOLU alcançou apenas 79,6% da redução das emissões líquidas necessária para o atingimento do *Net Zero* em 2050, indicando que esforços adicionais serão necessários.



Uma vez que algumas tecnologias ainda apresentavam um potencial para crescimento, sua aplicação foi intensificada no Cenário Rota+, para que, em alinhamento aos demais setores, se alcançasse a descarbonização necessária para o atingimento do *Net Zero* de Minas Gerais. Esse esforço resultou em uma redução adicional de 15,1 MtCO<sub>2</sub>e em 2050, elevando a descarbonização ao patamar de 96,5% em relação às emissões líquidas do ano-base 2023.

Assim como no Cenário Rota, no Cenário Rota+, a restauração florestal e o combate ao desmatamento foram as soluções responsáveis por reduzir grande parte das emissões totais do setor de AFOLU em 2050, sendo responsáveis por cerca de 60% em relação ao ano-base. Essas duas medidas se consagraram como as principais alavancas para a descarbonização do setor, a um custo de 75,1 R\$/tCO<sub>2</sub>e e 6,7 R\$/tCO<sub>2</sub>e, respectivamente. Adicional, as tecnologias de sistemas integrados ILP e ILPF intensificação da pecuária e manejo nutricional e melhoramento genético de bovinos também apresentam reduções expressivas nas emissões, contribuindo com o resultado do Cenário Rota+.

Esse desempenho foi alcançado por meio da restauração de 1,5 vez mais hectares de pastagens degradadas do que o previsto com o Plano ABC+ MG, de forma a restaurar todo o passivo ambiental atual de mais de 3 milhões de hectares em imóveis rurais. Com relação ao desmatamento, a estratégia adotada para o Cenário Rota+ foi a erradicação do desmatamento em Minas Gerais em todos os biomas, independentemente de sua legalidade, diferentemente do Cenário Rota, no qual foi avaliado a erradicação exclusivamente do desmatamento ilegal. Essa abordagem parte da premissa de uma agropecuária mais intensiva e inovadora no futuro, que propiciará a expansão de produção por meio de uma maior produtividade, sem a necessidade de abertura de novas áreas. Sendo assim, a estratégia do Cenário Rota+ está em linha com os compromissos nacionais, visto que, segundo a publicação do Observatório do Clima (2024) sobre a NDC brasileira, erradicar o desmatamento<sup>16</sup>, ilegal e legal, é essencial para alcançar a meta de limitar o aquecimento global em 1,5 °C.

Para a concretização desses resultados, serão necessários investimentos na ordem de R\$ 39,9 bilhões, que, em contrapartida trarão o retorno de R\$ 94,3 bilhões, gerando um lucro líquido para o setor de AFOLU de 54,4 bilhões.

## Setor de energia

Como mencionado, a avaliação das tecnologias no setor de energia considerou não apenas a redução de emissões no setor, mas também buscou reduzir o déficit entre a oferta e a demanda de fontes energéticas. Na análise, foi identificado que a eletricidade gerada a partir de fontes renováveis ultrapassava a demanda necessária em Minas Gerais. Porém, em

---

<sup>16</sup> O Observatório do Clima (2024) propõe o fim do desmatamento no Brasil, mas ressalta que ainda seria possível uma supressão residual de vegetação nativa no país de, no máximo, 1.000 quilômetros quadrados ao ano por intervenções de interesse social ou de utilidade pública, declinando ainda mais após 2035.



relação ao que diz respeito à produção de biocombustíveis, observou-se um déficit na disponibilidade de matéria-prima oriunda do setor de AFOLU, como cana-de-açúcar e soja, em relação à demanda de biocombustíveis necessários aos setores de indústria e transporte nos Cenários Rota e Rota+. Diante da limitação de insumos para ampliar a produção de biocombustíveis e considerando que as principais tecnologias necessárias para mitigar as emissões na geração de eletricidade e em refino de petróleo já haviam sido aplicadas, o setor de energia passou a apresentar um espaço reduzido para variações nas aplicações tecnológicas.

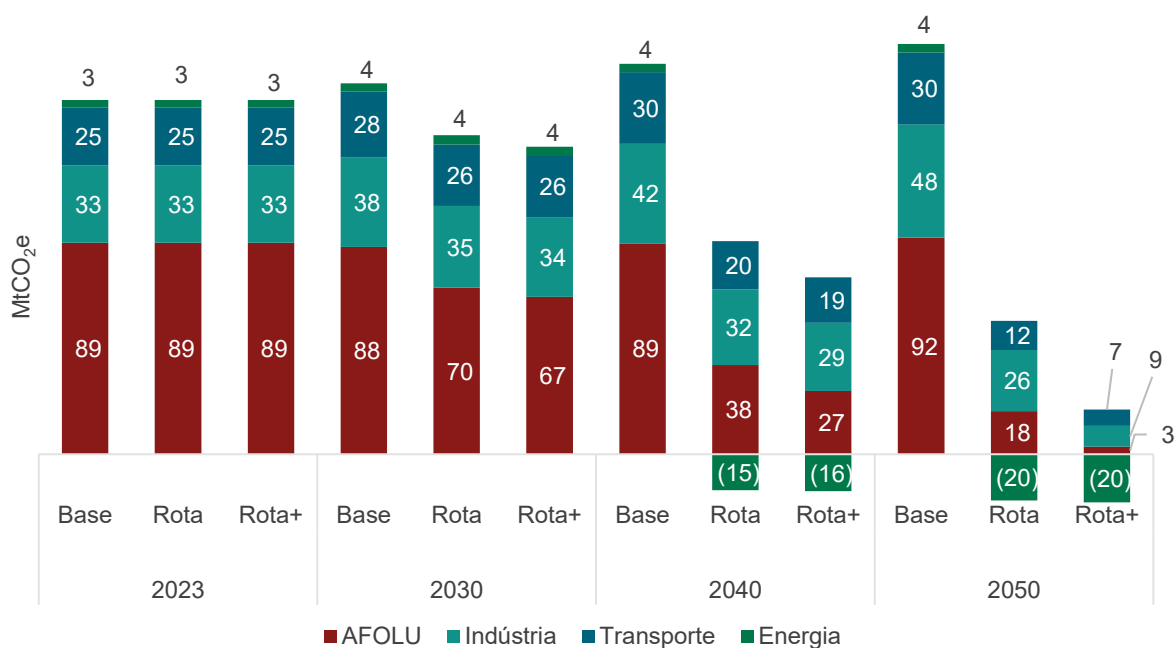
Ainda assim, foi identificada uma possibilidade de aumento no uso de biometano. No Cenário Rota, esse combustível foi destinado à descarbonização da indústria, do transporte e da refinaria de petróleo Refinaria Gabriel Passos (Regap). Entretanto, observou-se que a quantidade de biometano produzido em Minas Gerais não foi suficiente para atender à demanda necessária desses setores, e limitação ocorreu na Regap, que teve 60% da demanda atendida pelo gás renovável, e os outros 40% por gás natural. Já o Cenário Rota+ considerou a substituição de 100% do gás natural por biometano na Regap, adotando que 40% dessa demanda deva ser suprida por produção fora do estado, devido à insuficiência da oferta estadual. A substituição total do gás natural por biometano também impacta o projeto de Captura de carbono na Regap, reduzindo o potencial de mitigação do CCS, considerando que o combustível fóssil já foi descarbonizado com a substituição por fonte renovável.

## Resultados

Os esforços setoriais no aumento das aplicações das tecnologias resultam em um cenário de atingimento de *Net Zero*. O Cenário Rota+ resulta em  $-1,4 \text{ MtCO}_2\text{e}$ , ou seja, as remoções ultrapassam as emissões. A Figura 22 apresenta a comparação entre os três cenários e a contribuição de cada setor.



Figura 22: Comparação das emissões por cenário e setor



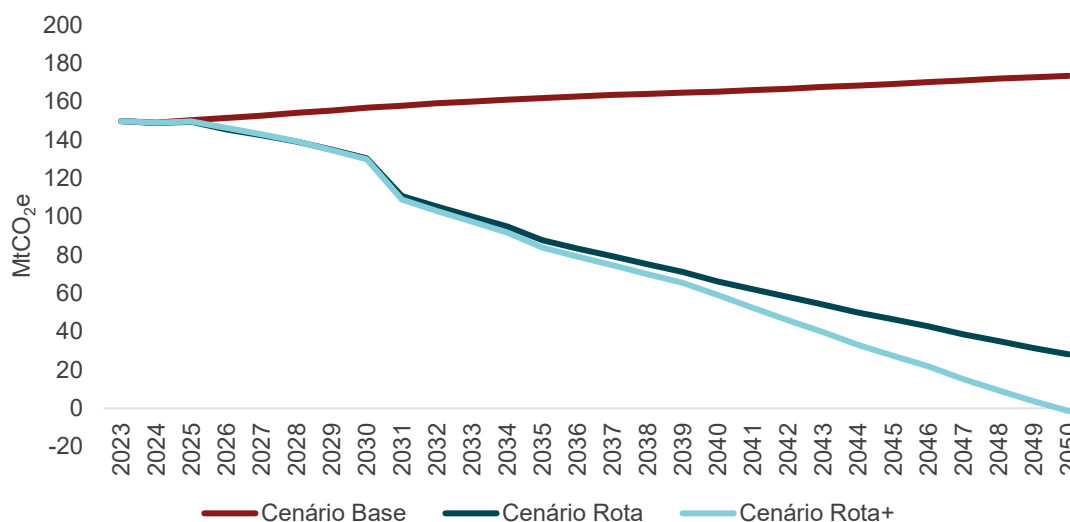
Fonte: Elaboração própria

Observa-se que esforços adicionais foram implementados em todos os setores. As alterações nas aplicações das tecnologias em AFOLU resultaram em uma redução de 96% das emissões do setor em 2050, em relação ao ano-base. O setor de indústria intensificou a aplicação de projetos com custo marginal de abatimento elevado e atingiu uma redução de 73%. O setor de transporte apresentou uma redução de 72% no mesmo período. Com relação ao setor de energia, que já havia intensificado suas reduções no Cenário Rota para atender ao máximo as demandas setoriais, não apresentou se verificou uma redução adicional significativa. Não obstante, ele permaneceu como o setor com o maior potencial de redução das emissões.

As emissões totais nos três cenários são apresentadas na Figura 23.



Figura 23: Emissões totais por cenário



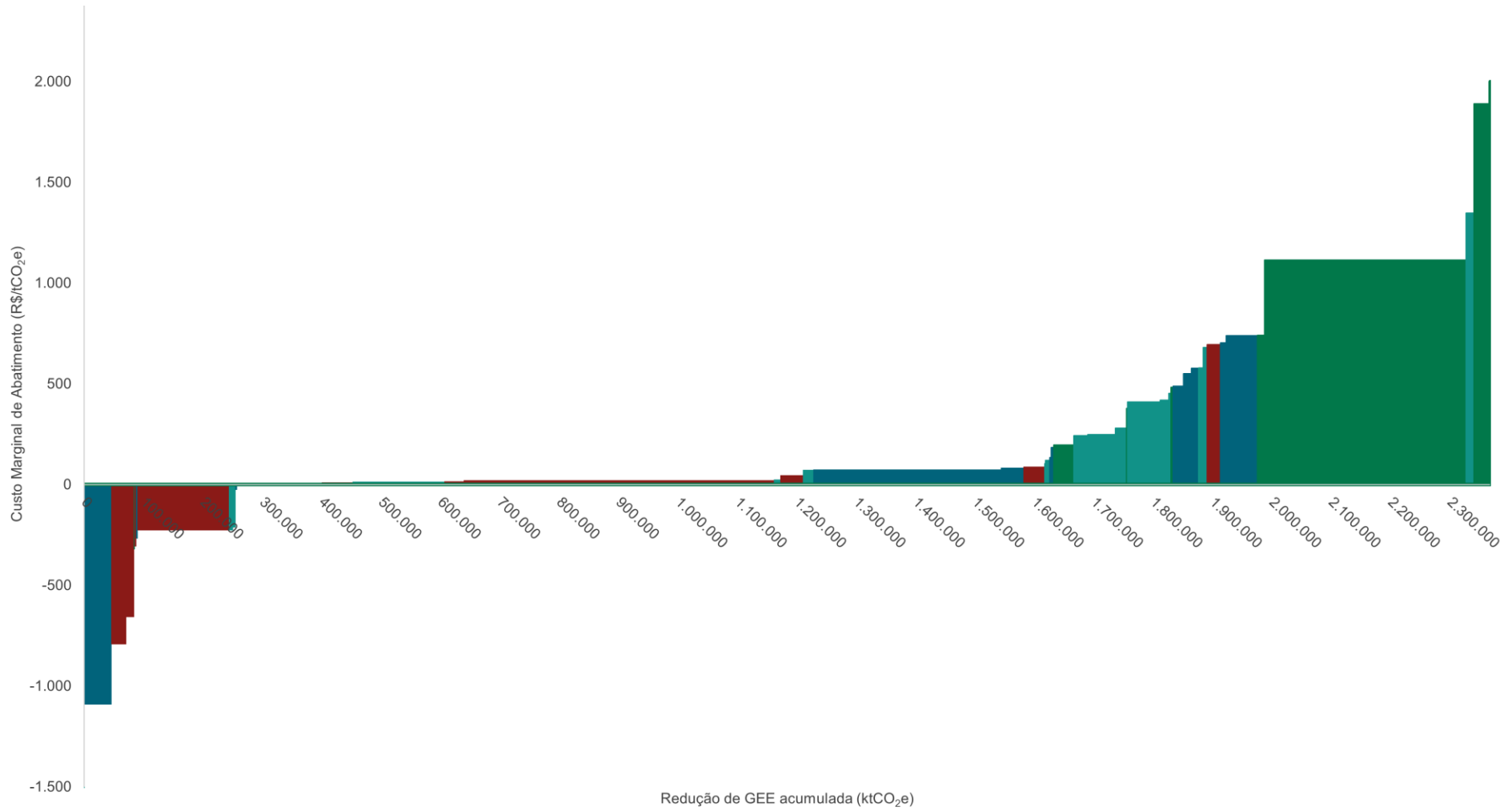
Fonte: Elaboração própria.

Importante destacar que, conforme apresentado na seção anterior, o atingimento do *Net Zero* no Cenário Rota+ está associado a aplicações expressivas das tecnologias avaliadas em níveis acima do que é esperado. O aumento da aplicação reflete também em um aumento do custo de atingimento do Cenário Rota+ de 8% em relação ao cenário Rota. A Figura 24 apresenta a MACC para o Cenário Rota+.

Nota-se ainda que o aumento da aplicação das tecnologias pode alterar seu posicionamento na MACC em relação às demais. Apesar desse aumento impactar tanto o VPL, quanto o potencial de redução de emissões, essas variações não ocorrem em uma proporção linear. Esse comportamento é observado em diversas tecnologias, por exemplo, o melhoramento genético, que era a segunda tecnologia mais custo efetiva no Cenário Rota e passou para a quarta posição no Cenário Rota+. Já a eletrificação de caminhões, que ocupava a quarta posição, avançou para a segunda posição nesse novo cenário.



Figura 24: Curva MAC – Cenário Rota+



- Indústria: eficiência energética - química
- AFOLU: Sistema Plantio Direto (SPD)
- Indústria: eficiência energética - mineração
- AFOLU: Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN)
- Energia: medidas de eficiência
- AFOLU: manejo adequado de fertilizantes nitrogenados
- AFOLU: intensificação da pecuária e manejo nutricional de bovinos
- Indústria: substituição de combustíveis fósseis - cimento
- AFOLU: restauração florestal
- Indústria: EAF - ferro-gusa e aço
- Indústria: eficiência energética - outras indústrias
- Indústria: carvão vegetal - ferro-gusa e aço
- Transporte: caminhão a hidrogênio
- Energia: CCS
- Energia: BioCCS biometano
- Indústria: substituição de combustíveis fósseis - química
- Transporte: uso de HVO em caminhões
- Energia: gás natural
- AFOLU: melhoramento genético de bovinos
- Energia: cogeração biodiesel
- AFOLU: sistemas integrados ILP e ILPF
- Transporte: eletrificação parcial de veículos leves
- AFOLU: manejo de resíduos agropecuários com biodigestores
- Indústria: aditivo ao clínquer - cimento
- AFOLU: uso agrícola de biocarvão
- Transporte: aumento do uso de biodiesel em caminhões
- AFOLU: recuperação de pastagens
- Indústria: substituição de combustíveis fósseis - ferroligas
- Transporte: mudança de modal
- Indústria: substituição de combustíveis fósseis - outras indústrias
- Indústria: redução direta a H2 - ferro-gusa e aço
- Transporte: ônibus a GNV/biometano
- Indústria: substituição de combustíveis fósseis - mineração
- Indústria: redução direta a gás natural - ferro-gusa e aço
- Transporte: uso de HVO em ônibus
- Indústria: CCS - cimento
- Transporte: eletrificação total de caminhões
- Indústria: eficiência energética - cimento
- Transporte: eletrificação total de veículos leves
- Transporte: aumento no uso de etanol em veículos leves
- AFOLU: redução do desmatamento
- Indústria: eficiência energética - ferro-gusa e aço
- AFOLU: floresta plantada
- Transporte: aumento do uso de biodiesel em ônibus
- Indústria: eficiência energética - ferroligas
- Transporte: eletrificação total de ônibus
- Energia: biometano
- Indústria: CCS - outras indústrias
- Indústria: CCS - ferro-gusa e aço
- Transporte: caminhões a GNV/biometano
- Transporte: substituição do querosene de aviação por SAF
- AFOLU: aditivos alimentares
- Energia: BioCCS etanol
- Energia: baterias

Fonte: Elaboração própria.



A Tabela 15 apresenta a variação, entre os cenários, na aplicação das tecnologias, no custo marginal de abatimento, no VPL e na redução de emissões.

O desafio de alcançar as emissões líquidas zero não é exclusivo de Minas Gerais. Os cenários *Net Zero* da Agência Internacional de Energia (IEA, na sigla em inglês) também evidenciam essa dificuldade (IEA, 2023). Segundo o relatório da instituição, 35% da redução de emissões está concentrada em tecnologias ainda em desenvolvimento (IEA, 2023). Nota-se, porém, que na versão anterior desse relatório essa participação era ainda mais expressiva, representando metade da redução das emissões, o que indicam um avanço significativo em termos de desenvolvimento e viabilização de tecnologias disruptivas (IEA, 2023).

Também no caso de Minas Gerais, além das tecnologias consideradas na análise, é natural esperar impactos decorrentes do desenvolvimento de novas soluções e do aprimoramento das tecnologias existentes. Nesse contexto, ganham destaques aquelas citadas na seção “Tecnologias não incluídas na MACC” dos relatórios de cada setor.

Diante disso, é fundamental que o Cenário Rota seja atualizado com alguma periodicidade. A inclusão tanto dos avanços tecnológicos quanto das novas expectativas setoriais permite direcionar de forma mais eficaz os esforços financeiros e políticos para o atingimento da meta *Net Zero* em Minas Gerais da forma mais custo efetiva.



Tabela 15: Comparação das tecnologias – Cenário Rota e Cenário Rota+

Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Cenário Rota				Cenário Rota +			
		Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )	Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )
<b>Transporte</b>									
<b>Transporte de passageiros</b>									
Aumento do uso de etanol em veículos leves (G2)	Aumento da participação do etanol hidratado frente à gasolina C (% de venda/ano)	80,00	-11,49	0,97	84,75	90,00	-0,83	0,08	100,51
	Aumento da mistura regulamentada (% em volume) de etanol anidro na gasolina	35,00				35,00			
Eletrificação parcial de veículos leves (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por veículos híbridos flex (HEV) nas categorias de automóveis e comerciais leves.	50,00	-25,31	0,06	2,34	40,00	-25,51	0,06	2,43
Eletrificação total de veículos leves (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por veículos elétricos a bateria (BEV) nas categorias de automóveis e comerciais leves	50,00	-224,87	1,22	5,45	60,00	-226,18	1,52	6,74
Ônibus a biometano/GNV4 (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por ônibus com motores movidos a gás, queimando mistura de GNV e biometano	20,00	576,40	-1,24	2,16	25,00	483,77	-1,78	3,68



Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Cenário Rota				Cenário Rota +			
		Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2</sub> e)	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2</sub> e)	Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2</sub> e)	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2</sub> e)
Aumento do uso de biodiesel em ônibus (G2)	Aumento da mistura regulamentada (% em volume) de biodiesel no diesel comercial	25,00	72,18	-0,24	3,38	25,00	72,85	-0,24	3,26
Uso de HVO em ônibus (G3)	Aumento da mistura regulamentada (% em volume) de HVO no diesel comercial	30,00	809,69	-7,67	9,47	50,00	741,89	-8,93	12,04
Eletrificação total de ônibus (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por ônibus elétricos a bateria	70,00	106,84	-0,85	7,95	75,00	120,19	-0,85	7,08
<b>Transporte de carga</b>									
Aumento do uso de biodiesel em caminhões (G2)	Aumento da mistura regulamentada (% em volume) de biodiesel no diesel comercial	25,00	72,08	-1,07	14,82	25,00	72,72	-1,04	14,29
Uso de HVO em caminhões (G3)	Aumento da mistura regulamentada (% em volume) de HVO no diesel comercial	30,00	807,97	-33,62	41,61	50,00	740,49	-39,17	52,89
Caminhões a GNV/biometano4 (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por caminhões com motores movidos a gás, queimando mistura de GNV e biometano	30 (apenas semipesados e pesados)	577,04	-5,80	10,05	35,00	488,45	-8,58	17,56
Eletrificação total de caminhões (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por caminhões semileves e leves elétricos a bateria. Caminhões alocados para o	50,00	-801,32	18,20	22,72	50,00	-791,58	19,56	24,71



Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Cenário Rota				Cenário Rota +			
		Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )	Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )
	Transporte Urbano de Carga (TUC)								
Substituição do querosene de aviação por SAF	Aumento da mistura regulamentada (% em volume) de SAF no querosene de aviação	20,00	637,58	-3,15	4,94	100,00	579,40	-4,38	7,56
Mudança de modal (G4)	Transição do uso do modal rodoviário para o ferroviário (em % de TKU)	20,00	157,01	-0,78	4,96	20,00	184,52	-0,78	4,22
Caminhão a hidrogênio (G1)	Maior participação no licenciamento de veículos novos por caminhões semipesados e pesados a hidrogênio. Caminhões alocados para o transporte regional carga	10,00	379,30	-0,45	1,18	15,00	379,31	-0,67	1,76
<b>AFOLU</b>									
Pecuária de baixo carbono (G1)									
Melhoramento genético de bovinos	Seleção de características genéticas desejáveis para aumentar a produtividade do rebanho	100,00	-564,16	3,64	6,44	100,00	-1.091,49	49,89	45,71
Manejo nutricional de bovinos	Otimização da dieta do rebanho para ganhos de produtividade e redução do metano entérico	100,00	18,13	-2,56	141,22	100,00	14,03	-1,97	140,10



Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Cenário Rota				Cenário Rota +			
		Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2</sub> e)	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2</sub> e)	Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2</sub> e)	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2</sub> e)
Recuperação de pastagens degradadas	Utilização de práticas agrícolas para estabelecimento de forragem de boa qualidade	100,00	83,20	-3,16	38,00	100,00	83,20	-3,16	38,00
Aditivos alimentares	Administração de moléculas redutoras de metano entérico em rebanhos bovinos	70,00	710,70	-4,84	6,81	-70,00	703,70	-6,79	9,65
Agricultura de baixo carbono (G2)									
Sistema de Plantio Direto (SPD)	Manejo agrícola que promove plantio direto na palha e rotação de culturas	100,00	-656,49	8,58	13,07	100,00	-656,49	8,58	13,07
Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN)	Utilização de bioinsumo para fertilização nitrogenada das culturas agrícolas	50,00	-215,01	0,83	3,88	53,30	-212,55	0,89	4,21
Manejo adequado de fertilizantes nitrogenados	Utilização de inibidores de nitrificação juntamente aos fertilizantes nitrogenados	40,00	8,47	-0,10	12,24	60,00	8,31	-0,20	23,55
Sistemas integrados ILP e ILPF	Manejo que combina atividades agrícolas, pecuárias e/ou florestais	100,00	-226,21	34,90	154,30	100,00	-226,21	34,90	154,30
Uso agrícola de biocarvão	Utilização de biomassa pirolisada (biocarvão) como condicionador de solo	33,00	8,13	-0,04	4,46	24,10	16,27	-0,53	32,68
Uso da Terra, Mudança de uso da Terra e Florestas (G3)									
Redução do desmatamento	Redução do avanço das atividades humanas sobre áreas de vegetação nativa	100,00 do desmatamento ilegal	7,01	-2,40	342,59	100,00 do desmatamento legal e ilegal	6,66	-3,20	481,20



Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Cenário Rota				Cenário Rota +			
		Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )	Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )
Restauração florestal	Recuperação da vegetação original de áreas desmatadas ou degradadas por atividades humanas	100,00	75,06	-23,70	315,78	100,00	75,06	-23,70	315,78
Iniciativas transversais (G4)									
Floresta plantada	Cultivo de espécies florestais comerciais	100,00	25,09	-0,27	10,62	100,00	25,09	-0,27	10,62
Manejo de resíduos agropecuários com biodigestores	Tratamento de dejetos animais em sistemas com biodigestão anaeróbia e captura e uso do biogás gerado	60,00	6,10	-0,06	9,73	100,00	6,25	-0,10	16,22
<b>INDÚSTRIA</b>									
Ferro-gusa e aço									
Forno a Arco Elétrico (EAF) (G2)	Aumento da produção de aço por meio de EAF	16,00	88,00	-2,07	23,47	20,00	88,00	-3,10	35,21
BF-BOF a carvão vegetal (G2)	Aumento da participação de BF-BOF a carvão vegetal na produção de aço	25,00	243,00	-5,71	23,45	25,00	243,00	-5,71	23,45
Redução direta a gás natural (RD-GN) (G2)	Aumento da participação de RD-GN na produção de aço	15,00	695,00	-19,33	27,81	12,00	695,00	-15,46	22,25
Redução direta a hidrogênio (RD-H2) (G3)	Aumento da participação de RD-H2 na produção de aço	10,00	411,00	-6,46	15,69	35,00	411,00	-22,60	54,91
Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) (G3)	Implementação de CCS na produção de aço	25,00	398,00	-4,15	10,43	65,00	419,00	-6,25	14,91



Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Cenário Rota				Cenário Rota +			
		Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )	Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )
Eficiência energética (G1)	Aumento na eficiência energética da produção de aço	12,00	17,00	-0,32	19,43	12,00	14,00	-0,20	14,63
Ferroligas									
Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como biometano, carvão vegetal e eletricidade, na produção de ferroligas	Eletricidade: 20	22,00	-0,02	0,98	Eletricidade: 30	104,00	-0,15	1,40
		Biometano: 5				Biometano: 8			
		Carvão vegetal: 55				Carvão vegetal: 52			
Eficiência energética (G1)	Aumento na eficiência energética da produção de ferroligas	8,00	96,00	-0,01	0,16	10,00	85,00	-0,01	0,14
Cimento									
Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como eletricidade, carvão vegetal e outras biomassas, na produção de cimento	Eletricidade: 15	46,00	-0,71	15,44	Eletricidade: 15	45,00	-1,73	38,30
		Carvão vegetal: 25				Carvão vegetal: 25			
		Outras biomassas: 30				Outras biomassas: 39			
Eficiência energética (G1)	Aumento na eficiência energética da produção de cimento	9,00	-128,00	0,63	4,94	9,00	-306,00	0,71	2,30



Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Cenário Rota				Cenário Rota +			
		Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )	Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )
Adições ao clínquer (G1)	Redução da razão clínquer/cimento	30,00	14,00	-0,55	38,68	40,00	11,00	-0,55	51,56
Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) (G3)	Implementação de CCS na produção de cimento	9,00	1.431,00	-6,15	4,30	75,00	1.891,00	-51,26	27,10
Química									
Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como eletricidade e biometano, na indústria química	Eletricidade: 65	673,00	-2,72	4,04	Eletricidade: 70	682,00	-4,64	6,81
		Biometano: 15				Biometano: 25			
Eficiência Energética (G1)	Aumento na eficiência energética da indústria química	12,00	-1.206,00	0,78	0,65	12,00	-2.549,00	0,88	0,35
Mineração									
Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como eletricidade e biometano, na mineração	Eletricidade: 60	426,00	-3,31	7,78	Eletricidade: 60	578,00	-7,15	12,36
		Biometano: 7				Biometano: 18			
Eficiência energética (G1)	Aumento na eficiência energética da mineração	10,00	-154,00	0,39	2,51	10,00	-266,00	0,54	2,04
Outras Indústrias									
Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como eletricidade, lenha e	Eletricidade: 45	321,00	-13,20	41,15	Eletricidade: 43	248,00	-11,54	46,49
		Lenha: 17				Lenha: 20			



Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Cenário Rota				Cenário Rota +			
		Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )	Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2e</sub> )	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2e</sub> )
	biometano, na produção de outras indústrias	Biometano: 4				Biometano: 8			
Eficiência energética (G1)	Aumento na eficiência energética da produção de outras indústrias	8,00	56,00	-0,17	3,09	8,00	136,00	-0,36	2,66
Captura e Armazenamento de Carbono (CCS)	Implementação de CCS na produção de outras indústrias	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	75,00	281,00	-5,28	18,76
<b>ENERGIA</b>									
Eletricidade (G1)									
Expansão da geração hidrelétrica – Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR)	Aumento da geração hidrelétrica por UHR, substituindo usinas térmicas fósseis	73	7.262,00	-15,61	2,15	73,00	7.262,00	-15,61	2,15
Implementação de sistemas de armazenamento de energia em bateria em alta tensão – BESS	Armazenamento de energia em baterias em larga escala, substituindo térmicas fósseis e compensando a intermitência das fontes renováveis	27	2.000,00	-1,29	0,65	27,00	2.000,00	-1,29	0,65
Refino de petróleo (G2)									
Medidas de eficiência energética	Implementação de medidas de eficiência energética nas seguintes unidades da Regap: UDA, FCC e UCR	100	2,70	-0,01	2,74	100	2,70	-0,01	2,74
Gás natural em substituição do óleo combustível	Substituição do óleo combustível utilizado na Regap para o gás natural	100	1.349,00	-17,95	13,30	100	1.349,01	-17,95	13,30



Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Cenário Rota				Cenário Rota +			
		Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2</sub> e)	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2</sub> e)	Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO <sub>2</sub> e)	VPL (10 <sup>9</sup> R\$)	Mitigação acumulada (MtCO <sub>2</sub> e)
Biometano em substituição do gás natural	Substituição gradual (até 60%) do gás natural utilizado na refinaria para o biometano	60	197,00	-4,00	20,28	100	197,21	-6,66	33,80
Captura de carbono nas unidades de FCC e UGH	Captura e armazenamento de carbono nas seguintes unidades da Regap: FCC e UGH	59 (FCC)	381,00	-1,63	4,28	59 (FCC)	453,73	-1,40	3,10
		99 (UGH)				99 (UGH)			
Produção de biocombustíveis (G3)									
Sistemas de cogeração em usinas de biodiesel	Instalação de sistemas de cogeração com utilização de resíduos agroflorestais em usinas de produção de biodiesel	100	-320,00	0,46	1,43	100	-320,00	0,46	1,43
Captura de carbono nas usinas de cogeração a bagaço de cana	Captura e armazenamento de carbono biogênico nas usinas de cogeração a bagaço de cana para produção de etanol	64	1.116,00	-378,52	339,23	64	1.116,00	-378,52	339,23
Captura de carbono na produção de biometano	Captura e armazenamento de carbono biogênico no processo de purificação do biogás para produção de biometano	98	551,00	-7,30	13,25	98	551,00	-7,30	13,25

Fonte: Elaboração própria.



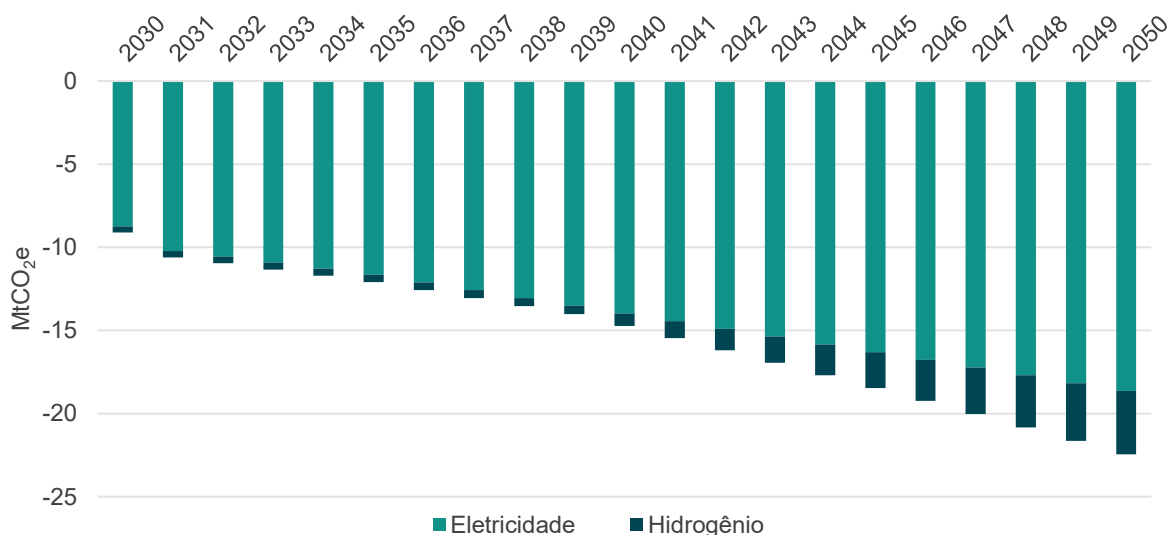
## Emissões evitadas

As tecnologias analisadas não reduzem emissões apenas dentro da fronteira de Minas Gerais, elas têm o potencial de evitar emissões em outros estados. As emissões evitadas são um conceito da ciência climática referente a serviços e produtos que resultam em redução ou prevenção de emissões fora da cadeia de valor abrangida (SBTi, 2020a), como a eletricidade renovável produzida por um estado que é consumida por outro. Apesar da abordagem utilizada no estudo não considerar essas reduções como parte do Cenário Rota ou Rota+, a contabilização dessas emissões é importante para mostrar o impacto do estado na descarbonização do país, contribuindo para o cumprimento dos compromissos climáticos do Brasil e para o objetivo maior de limitar o aquecimento global em 1,5 °C.

Em Minas Gerais, as emissões evitadas concentram-se no setor de energia, especificamente na geração de eletricidade e produção de hidrogênio. No caso da eletricidade, existe um potencial de geração fotovoltaica acima da demanda, o que evitaria 18,7 MtCO<sub>2</sub>e em 2050 (Figura 25). Essa oferta elevada de eletricidade de fonte renovável também auxilia na produção em larga escala de hidrogênio verde no estado.

Os avanços recentes do setor no estado, como a expansão da fábrica da empresa alemã Neuman & Esser (SEDE, 2024), contribuem para a redução dos custos de eletrolisadores, que atualmente chegam a mais de 8 mil R\$/kW (BHANDARI, 2025), tornando essa opção mais custo efetiva. Dessa forma, adicionalmente a atender à demanda futura dos setores de transporte e indústria, o estado ainda teria a oportunidade de exportar hidrogênio para outras regiões do país, totalizando uma redução de aproximadamente 3,8 MtCO<sub>2</sub>e (Figura 25).

Figura 25: Emissões evitadas: geração de eletricidade renovável e produção de hidrogênio verde



Fonte: Elaboração própria.



## Considerações finais

O produto 2.3 apresentou uma análise da viabilidade do atingimento do *Net Zero*, considerando as interações entre os setores de energia, indústria, transporte e AFOLU.

As análises indicam que, na ausência de esforços direcionados para a implementação de tecnologias de descarbonização, e considerando o crescimento econômico e populacional de Minas Gerais, as emissões do estado devem aumentar em 15%. Mesmo com a aplicação dessas tecnologias da forma como se projetou no Cenário Rota, considerando seja o maior rigor regulatório, sejam os níveis tidos como factíveis pelos especialistas, o objetivo de atingir as emissões líquidas zero não é alcançado. Os esforços apresentados no Cenário Rota reduzem as emissões em 75%, a um custo adicional de R\$ 512 bilhões em relação ao Cenário Base.

Adicionalmente, foi avaliado o Cenário Rota+, que contempla a trajetória necessária para o atingimento do *Net Zero*. Nessa análise, o alcance do *Net Zero* está condicionado a aplicações robustas das tecnologias avaliadas, em níveis superiores aos considerados atualmente como viáveis. O Cenário Rota+ implica um custo de R\$ 553 bilhões em relação ao Cenário Base, 8% a mais em relação ao Cenário Rota.

Ressalta-se que, para além das tecnologias incluídas nos cenários, espera-se que outras ganhem maturidade e que novas sejam desenvolvidas, ampliando a possibilidade de descarbonização e o atingimento do *Net Zero*. Nesse contexto, atualizações frequentes dos cenários são fundamentais para capturar essas inovações, identificando oportunidades e reavaliando os desafios relacionados ao alcance das metas.

Foi possível notar que, apesar de a maior parte das tecnologias não garantir um retorno financeiro direto, seus impactos estratégicos vão além da redução das emissões. Essas tecnologias podem contribuir para melhoria da qualidade de vida da população e para o desenvolvimento econômico do estado. No setor industrial, por exemplo, o desenvolvimento setorial baseado em fontes renováveis pode contribuir para o aumento da geração de empregos e renda no estado, como no caso da substituição do carvão mineral importado por uma cadeia produtiva local. Ademais, a adoção de tecnologias que utilizam resíduos na produção de cimento pode reduzir a destinação desses materiais para aterros, promovendo uma gestão mais eficiente dos resíduos industriais. Ainda em relação ao uso de resíduos, destaca-se o potencial de sinergia entre os setores indústria e transporte. O aumento do uso da tecnologia forno a arco elétrico depende, entre outros fatores, da disponibilidade de sucata metálica como insumo. Com incentivos e políticas públicas adequadas, parte significativa dessa sucata pode ser proveniente do setor de transporte, por meio da destinação adequada de veículos fora de circulação.

No caso do setor de AFOLU, os ganhos podem ser vistos em termos de ampliação do acesso a mercados exigentes e a linhas de financiamento verde, além do aumento da geração de empregos e estímulo à inovação. Também pode-se observar benefícios nas questões de



ordem ambiental, o que tem consequências econômicas indiretas, como aumento da resiliência climática e segurança hídrica e a conservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos.

Quando observamos o setor de transporte, existe um potencial de atração de investimentos relacionados à mobilidade elétrica, visto que o estado vem aumentando sua produção de lítio, mineral utilizado na produção das baterias. Somado a isso, o uso de veículos elétricos leves e pesados auxilia na redução da concentração de poluentes atmosféricos locais, que causam impactos na saúde da população. Ademais dos projetos relacionados ao modal rodoviário, a ampliação do uso do transporte ferroviário de carga pode trazer diversos benefícios econômicos em termos de eficiência logística, auxiliando no escoamento da produção do estado para os principais portos brasileiros.

Com relação ao setor de energia, o aproveitamento de resíduos sucroenergéticos para produção de biometano e captura de carbono representa uma oportunidade não apenas de expansão econômica e geração de empregos, mas também de fortalecimento de uma economia sustentável, baseada em modelos de produção mais limpos. As tecnologias sugeridas para a expansão de eletricidade visam reduzir emissões do setor e, ao mesmo tempo, garantir segurança energética ao estado, promovendo a inovação e geração de empregos qualificados. Por fim, a reestruturação do refino de petróleo, além de descarbonizar a atividade, prepara as infraestruturas para uma rota mais sustentável, facilitando a transição para uma biorrefinaria.

Nesse contexto é fundamental destacar a correlação entre os setores. A produção do setor de AFOLU é matéria-prima para o setor de energia, que gera combustíveis renováveis, auxiliando na descarbonização dos setores de transporte e indústria. No exercício realizado, o estado foi tratado como um sistema aberto, em que oferta e demanda não obrigatoriamente se igualavam. Dessa forma, houve um descompasso entre a necessidade de biocombustíveis e a capacidade de ofertá-los, devido à limitação de matéria-prima, especialmente soja e cana-de-açúcar, que historicamente têm outros destinos. Portanto, as análises futuras podem focar a identificação das melhores rotas para o suprimento de biocombustíveis no estado, avaliando os mecanismos necessários para uma melhor integração entre os setores.

Apesar do déficit observado entre a oferta e a demanda na maioria dos biocombustíveis, o cenário é inverso quando se trata da geração de eletricidade. Mesmo diante do aumento da demanda impulsionada pela eletrificação nos setores de transporte e energia, Minas Gerais é capaz de ofertar excedente para os outros estados, contribuindo para a descarbonização dos demais estados brasileiros, que passam a ter disponível uma energia elétrica com menor fator de emissão associado. As emissões evitadas pelo estado em 2050 chegam a 22,5 MtCO<sub>2e</sub>.

Portanto, o atingimento do *Net Zero* no Cenário Rota+ representa não apenas um desafio para o estado, mas também uma oportunidade estratégica para impulsionar a economia, atraindo investimentos de empresas comprometidas com a sustentabilidade e promovendo a inovação. Nesse sentido, a definição de políticas públicas e de mecanismos de financiamento,



ambos fundamentais para viabilizar a transição, será objeto de análise detalhada nos próximos produtos do projeto.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCENTURE. **Decarbonizing Energy: From A to Zero**, 2020. Disponível em: <https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/a-com-migration/pdf/pdf-135/accenture-decarbonizing-energy-section1-ldm.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ANFAVEA. **Avançando nos caminhos da descarbonização automotiva no Brasil**. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES, 2024. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2024/09/Anfavea-Avancando-nos-Caminhos-da-Descarbonizacao-2024-Publicacao.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2025.

ANTAQ. **Diagnóstico de descarbonização, infraestrutura e aplicações do hidrogênio nos Portos**. GIZ/ANTAQ/MPOR/BRASIL, 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antaq-1/GIZAL23A\\_240429\\_P6\\_Guia\\_de\\_Recomendacoes\\_V8.0.pdf](https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antaq-1/GIZAL23A_240429_P6_Guia_de_Recomendacoes_V8.0.pdf). Acesso em: 23 abr. 2025.

ARNABOLDI, M.; AZZONE, G.; GIORGINO, M. Long- and Short-Term Decision Making. *In: Performance Measurement and Management for Engineers*. [s.l: s.n.]. p. 107-115.

AUTOINDÚSTRIA. **Na USP, testes com hidrogênio renovável a partir do etanol**, 2025. Disponível em: <https://www.autoindustria.com.br/2025/02/20/na-usp-testes-com-hidrogenio-renovavel-a-partir-do-etanol/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

BLOOMBERGNEF. **Energy and climate scenarios that connect the dots. New Energy Outlook 2024: Executive Summary**. [s.l: s.n.]. Disponível em: [https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/847353\\_NEO24\\_ExecSum.pdf](https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/847353_NEO24_ExecSum.pdf). Acesso em: 19 mar. 2025.

BNDES. **Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa**. BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2022. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22665/1/PRLiv\\_Hidrog%C3%AAnio%20de%20baixo%20carbono\\_215712.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22665/1/PRLiv_Hidrog%C3%AAnio%20de%20baixo%20carbono_215712.pdf). Acesso em: 11 mar. 2025.

BRASIL. **Análise Econômica de Diferentes Rotas de Produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação**. ProQR. Combustíveis Alternativos Sem Impactos Climáticos. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/analise-economica-diferentes-rotas-de-producao-de-saf.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2025.

BRASIL. **Presidente Lula sanciona Lei do Combustível do Futuro para promover a mobilidade sustentável. Norma estabelece a criação de programas nacionais de diesel verde, de combustível sustentável para aviação e de biometano, entre outras medidas**, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2024/10/presidente-lula-sanciona-lei-do-combustivel-do-futuro-para-promover-a-mobilidade-sustentavel>. Acesso em: 9 out. 2024.



CENTRO CLIMA; COPPE/UFRJ. **COPPE sedia reunião anual da rede internacional Imaclim: modelo matemático sobre economia e mudanças climáticas**, 2024. Disponível em: <https://www.centroclima.coppe.ufrj.br/index.php/en/destaque-3/noticias/174-coppe-sedia-reuniao-anual-da-rede-internacional-imaclim-modelo-matematico-sobre-economia-e-mudancas-climaticas>. Acesso em: 6 jan. 2025.

CREDIDIO, J.; SERRA, B. (Coord.). **Estudo da frota circulante brasileira** – Sindicato Nacional de Indústria de Componentes para Veículos Automotores – SINDIPEÇAS. São Paulo, 2008.

CHIAPPINI, G. **USP testa conversão de etanol em hidrogênio e rendimento no abastecimento de veículos. Planta-piloto tem capacidade para produzir 100 quilos de hidrogênio por dia para testes no Toyota Mirai, Hyundai Nexo e ônibus da cidade universitária**, 2025. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/usp-testa-conversao-de-etanol-em-hidrogenio-e-rendimento-no-abastecimento-de-veiculos/>.

COPPE/UFRJ. **Ônibus híbrido elétrico-hidrogênio da Coppe faz primeira viagem de teste com passageiros**, 2024. Disponível em: <https://coppe.ufrj.br/planeta-coppe/onibus-hibrido-eletrico-hidrogenio-da-coppe-faz-primeira-viagem-de-teste-com-passageiros/#:~:text=O%20%C3%B4nibus%20h%C3%ADbrido%20n%C3%A3o%20polui,C omunica%C3%A7%C3%A3o%20da%20Prefeitura%20de%20Maric%C3%A1>. Acesso em: 11 mar. 2025.

DDP INITIATIVE. **ECW BIICS Data**, 2023. Disponível em: <https://ddpinitiative.org/ecw-biics-data/>. Acesso em: 6 jan. 2025.

DE OLIVEIRA, L. P. N. Modelagem de custos de abatimento e de curvas de aprendizagem tecnológica. indústria. Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil. In: **Opções de mitigação de emissões de GEE em setores-chave do Brasil**, 2015. Disponível em: [https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/projeto\\_opcoes\\_mitigacao/modelagem\\_abatimento\\_aprend\\_tecnologico/custo\\_abat\\_apren\\_tecn\\_industrial.pdf](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/projeto_opcoes_mitigacao/modelagem_abatimento_aprend_tecnologico/custo_abat_apren_tecn_industrial.pdf). Acesso em: 14 mar. 2025.

FERONI, W. J. *et al.* Tecnologia do hidrogênio para a descarbonização do setor de transporte: análise do Toyota Mirai com o Software Advisor. **Amazônia: Industrial e Sustentável**, 24º Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial. v. 24, p. 1-18, 2024.

FERREIRA, J. V. **Donos de Toyota Mirai processam montadora por indisponibilidade de hidrogênio – Veículo é primeiro carro movido pela substância a ser produzido em série; ele é vendido apenas na Califórnia, onde proprietários enfrentam problemas para abastecer**, 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/auto/donos-de-toyota-mirai-processam-montadora-por-indisponibilidade-de-hidrogenio/>. Acesso em: 10 mar. 2025.



FGV. **Ferramenta de Cálculo de Emissões de GEE**, 2024. Disponível em: <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScOGEiYFNZMPA0RII2UuuiEgybiO-0A9Pr9yecwlvLFrhXSA/viewform?usp=header>. Acesso em: 9 jan. 2025.

FJP. **2024.09.12\_Anexo Estatístico – PIB mg 2 trim 2024**, 2024a. Disponível em: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1oBXEdWqriSUPbV5oJhIqKmr1TOwJ4skB/edit?gid=1534330172#gid=1534330172>. Acesso em: 6 jan. 2025

FJP. **Informativo CEI: retroplacação da série do PIB de Minas Gerais/1995:2007**. FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2009. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.mg.gov.br/consulta/consultaDetalheDocumento.php?iCodDocumento=73471>. Acesso em: 6 jan. 2025.

FJP. **PIB dos municípios de Minas Gerais – 2010 a 2021**, 2024b. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNWl1OTZmNDUtZDAzZS00ZWl4LTlmZDYtN2NhZTc1MDNlYzI4IiwidCI6IjA5ZGY3MWFILWQ2YzUtNGFkYi1iMjVjLTlkMmRjZDQwMWFjMiJ9>. Acesso em: 6 jan. 2025.

GONÇALVES, D. N. S.; GOES, G. V.; D'AGOSTO, M. DE A. **Panorama e cenários prospectivos para atendimento da Contribuição Nacionalmente Determinada**. INSTITUTO BRASILEIRO DE TRANSPORTE SUSTENTÁVEL – IBTS, 2019. Disponível em: [https://ibts.eco.br/src/uploads/2019/12/transportes-no-brasil\\_relatorio-de-referencia.pdf](https://ibts.eco.br/src/uploads/2019/12/transportes-no-brasil_relatorio-de-referencia.pdf). Acesso em: 6 jan. 2025.

GRUBB, M. *et al.* The costs of limiting fossil-fuel CO<sub>2</sub> emissions: a survey and analysis. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 1, n. 18, p. 397-478, 1993.

HE, W. *et al.* Integration of renewable hydrogen in light-duty vehicle: Nexus between energy security and low carbon emission resources. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2020.

IBGE. **Censo Demográfico 2000: publicações**. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2000. Disponível em: [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/308/cd\\_2000\\_v7.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/308/cd_2000_v7.pdf). Acesso em: 6 jan. 2025.

IBGE. **Minas Gerais: Panorama**, 2024. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama>. Acesso em: 6 jan. 2025.

IEA. **A roadmap for the Global Energy Sector. 2021. Net Zero by 2050**. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector\\_CORR.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf). Acesso em: 17 mar. 2025.

IPCC. **Definitions of terms**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/definitions.html>. Acesso em: 11 dez. 2024.



KERAMIDAS, K. *et al.* **Global Energy and Climate Outlook 2024 Updating NDCs and closing the ambition gap. indicators for 1.5°C alignment.** Eupean Commission, 2025. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC139986>.

LA ROVERE, E. L. *et al.* **Projeto Decarboost:** viabilização de investimentos na transição para uma sociedade de baixo carbono em países latino-americanos. [s.l: s.n.]. Disponível em: [https://www.centroclima.coppe.ufrj.br/images/documentos/Plano\\_Mitiga%C3%A7%C3%A3o\\_Setor\\_Transporte\\_-\\_Estrat%C3%A9gia\\_Descarboniza%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://www.centroclima.coppe.ufrj.br/images/documentos/Plano_Mitiga%C3%A7%C3%A3o_Setor_Transporte_-_Estrat%C3%A9gia_Descarboniza%C3%A7%C3%A3o.pdf).

LUCANTONIO, S. *et al.* Green Diesel Production via Deoxygenation Process: A Review. **Energies**, v. 16, n. 2, Itália, p. 1-44, 2023.

MARICÁ, Prefeitura de. **Fontes de hidrogênio natural são encontradas em Maricá**, 2023. Disponível em: <https://www.marica.rj.gov.br/noticia/fontes-de-hidrogenio-natural-sao-encontradas-em-marica/#:~:text=No%20primeiro%20painel%20do%20dia,Fran%C3%A7a%20Espanha%20e%20Reino%20Unido>. Acesso em: 13 mar. 2025.

MARICÁ, Prefeitura de. **Ônibus movido a hidrogênio é destaque de seminário em Maricá**, 2024. Disponível em: [https://www.marica.rj.gov.br/noticia/onibus-movido-a-hidrogenio-e-destaque-de-seminario-em-marica/#:~:text=O%20%C3%B4nibus%20h%C3%ADbrido%20movido%20%C3%A0,feira%20\(07%2F08\)>](https://www.marica.rj.gov.br/noticia/onibus-movido-a-hidrogenio-e-destaque-de-seminario-em-marica/#:~:text=O%20%C3%B4nibus%20h%C3%ADbrido%20movido%20%C3%A0,feira%20(07%2F08)>). Acesso em: 13 mar. 2025.

MINAS GERAIS. **4º Inventário de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa.** Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais (SEMAD), 2022.

MMA. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 – ano-base 2012:** Relatório Final. [s.l.] Ministério do Meio Ambiente, 2014. Disponível em: [https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario\\_de\\_Emissoes\\_por\\_Veiculos\\_Rodoviaros\\_2013.pdf](https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviaros_2013.pdf). Acesso em: 6 jan. 2025.

MME. **Análise Econômica de Diferentes Rotas de Produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação.** Ministério de Minas e Energia, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/analise-economica-diferentes-rotas-de-producao-de-saf.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2025.

NGFS. **NGFS Scenarios for central banks and supervisors.** NETWORK FOR GREENING THE FINANCIAL SYSTEM, 2022. Disponível em: [https://www.ngfs.net/system/files/import/ngfs/medias/documents/ngfs\\_climate\\_scenarios\\_for\\_central\\_banks\\_and\\_supervisors\\_.pdf](https://www.ngfs.net/system/files/import/ngfs/medias/documents/ngfs_climate_scenarios_for_central_banks_and_supervisors_.pdf). Acesso em: 12 dez. 2024.



SANTOS, M. F. **2ª Conferência. Modo de Transporte Ferroviário Eficiência e Transição Energética. Eletrificação ferroviária.** In: INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL, 2023. Disponível em: [https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/2023/202304\\_oe\\_ip\\_energiatracao.pdf](https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/2023/202304_oe_ip_energiatracao.pdf). Acesso em: 29 abr. 2025.

SBTI. SBTi. **SBTi Corporate Net-Zero Standard Criteria.** Science Based Targets initiative, 2024. Disponível em: <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/Net-Zero-Standard-Criteria.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2025.

SHELL. **Brasil: liderando o mundo rumo à neutralidade de emissões.** Shell Cenários, 2024. Disponível em: <https://www.shell.com/news-and-insights/scenarios.html>.

SZULC, T.; KRAWCZYK, G. Total Cost of Ownership of Fuel Cell (Fcev) and Electric (Ev) Buses in Delivery of Public Transportation Services on the Example of Upper-Silesian and Zagłębie Metropolis. **Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization & Management/Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Seria Organizacji i Zarzadzanie, (190)**, p. 199-211, 2023.

TCFD. **Technical Supplement. The Use of Scenario Analysis in Disclosure of Climate-Related Risks and Opportunities.** [s.l.] TASK FORCE ON CLIMATE-RELATED FINANCIAL DISCLOSURES, 2017. Disponível em: <https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2021/03/FINAL-TCFD-Technical-Supplement-062917.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2024.

TNA\_BRAZIL. **Relatório de avaliação de necessidades tecnológicas para implementação de planos de ação climática no Brasil: mitigação.** Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2021. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/tna\\_brazil/arquivos/pdf/relatorio-de-avaliacao-de-necessidades-tecnologicas-para-implementacao-de-planos-de-acao-climatica-no-brasil-mitigacao.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/tna_brazil/arquivos/pdf/relatorio-de-avaliacao-de-necessidades-tecnologicas-para-implementacao-de-planos-de-acao-climatica-no-brasil-mitigacao.pdf). Acesso em: 14 mar. 2025.

UK. **Conversion factors 2024:** full set (for advanced users). 2024.

WAYCARBON. **Curva MAC:** o que é e como pode auxiliar na estratégia de redução de emissões?, 2022. Disponível em: <https://waycarbon.com/pt/blog/curva-mac-o-que-e-e-como-pode-auxiliar-na-estrategia-de-reducao-de-emissoes/>. Acesso em: 25 mar. 2025.

WBCSD. **Guidance on Avoided Emissions:** helping business drive innovations and scale solutions toward Net Zero. World Business Council for Sustainable Development, 2023. Disponível em: [https://www.wbcds.org/wp-content/uploads/2023/09/Climate-Avoided-Emissions-guidance\\_WBCSD.pdf](https://www.wbcds.org/wp-content/uploads/2023/09/Climate-Avoided-Emissions-guidance_WBCSD.pdf). Acesso em: 6 mar. 2025.



WORLD BANK. **Finance Concepts for Investment Decisions Session 5**. World Bank Group Water, Water and Sanitation Program, 2021. Disponível em: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/197501544810224462-0090022018/related/Session050Basi11lity0Finance0160413.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2025.

XU, Z. Hydrogen Fuel-cell Technology in Electric Vehicles: Current Usage, Materials and Future Applications. **Highlights in Science, Engineering and Technology**, v. 17, 2022.



# ANEXO

## Fichas Técnicas

### Grupo 1 – Sistemas de propulsão alternativos

#### Tecnologia: Eletrificação parcial de veículos leves

Ano inicial: 2025

Ano final: 2050

Redução total de emissões:

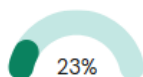
**2,34 MtCO<sub>2</sub>e**

Valor Presente Líquido:

**0,59 Bilhões de R\$**

Custo Marginal de Abatimento:

**-25 R\$/tCO<sub>2</sub>e**



#### Premissas técnicas:

- O rendimento energético de veículos convencionais e híbridos (HEV) considerados são do programa brasileiro de etiquetagem veicular (PBEV), referente ao único veículo híbrido flex comercializado no Brasil, o Toyota Corolla.

#### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;  
- O custo de veículos convencionais e híbridos (HEV) são estimados a partir dos preços de venda de veículos comercializados no Brasil e da estimativa do custo anual com combustíveis.

Ano	Percentual de Aplicação de Veículos Leves	Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2</sub> e/ano)
2025	0,0%	0,0
2026	2,5%	0,8
2027	5,0%	2,3
2028	7,5%	5,1
2029	10,0%	10,3
2030	15,0%	17,6
2031	18,5%	25,9
2032	22,0%	35,0
2033	25,5%	44,5
2034	29,0%	54,1
2035	32,5%	63,6
2036	36,0%	73,9
2037	39,5%	83,8
2038	43,0%	93,0
2039	46,5%	101,5
2040	50,0%	110,2
2041	52,0%	119,3
2042	54,0%	128,6
2043	56,0%	138,2
2044	58,0%	148,0
2045	60,0%	158,1
2046	58,0%	167,6
2047	56,0%	176,5
2048	54,0%	184,9
2049	52,0%	192,7
2050	50,0%	200,0



## Tecnologia : Eletrificação total de veículos leves

Ano inicial: 2025

Ano final: 2050

Redução total de emissões:

5,45 MtCO<sub>2</sub>e

Valor Presente Líquido:

1,22 Bilhões de R\$

Custo Marginal de Abatimento:

-225 R\$/tCO<sub>2</sub>e

### Premissas técnicas:

- O rendimento energético de veículos convencionais e 100% elétricos (BEV) considerados são do PBEV, referente aos veículos comercializados no Brasil, sendo o Kwid e o Peugeot 2008 e suas versões elétricas.

### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;  
- O custo de veículos convencionais e 100% elétricos (BEV) são estimados a partir de preços de venda e do valor e periodicidade das manutenções previstas e divulgadas pelas montadoras.

Ano	Percentual de Aplicação de Veículos Leves	Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2</sub> e/ano)
2025	0,0%	0,0
2026	0,8%	1,1
2027	1,7%	3,3
2028	2,5%	7,5
2029	3,3%	15,1
2030	5,0%	25,9
2031	7,0%	40,1
2032	9,0%	57,0
2033	11,0%	76,0
2034	13,0%	96,3
2035	15,0%	117,4
2036	17,0%	140,5
2037	19,0%	163,7
2038	21,0%	186,3
2039	23,0%	207,7
2040	25,0%	230,3
2041	27,5%	255,2
2042	30,0%	282,4
2043	32,5%	311,8
2044	35,0%	343,5
2045	40,0%	379,8
2046	42,0%	417,8
2047	44,0%	457,7
2048	46,0%	499,3
2049	48,0%	542,8
2050	50,0%	588,1



## Tecnologia : Eletrificação total de Ônibus

Ano inicial: 2025

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

7,95 MtCO<sub>2</sub>e

-0,85 Bilhões de R\$

107 R\$/tCO<sub>2</sub>e

### Premissas técnicas:

-O market-share de ônibus elétrico aumentará até atingir 70% dos licenciamentos em 2050 de acordo com continuidade de iniciativas como do Novo PAC e metas municipais (São Paulo, Curitiba, São José dos Campos e Salvador);

- Os rendimentos energéticos dos ônibus (BEV) tem como referência o valor de 0,68 km/kWh e o ônibus a diesel 2,2 km/l, dados de cidades contempladas com recursos do Novo PAC.

### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;

- Para o CAPEX foi considerado o investimento adicional da diferença entre ônibus convencional e elétrico e o investimento da infraestrutura de recarga;

- Para o OPEX foi considerada a economia de combustível e com manutenções.

Ano	Percentual ônibus elétrico	Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2</sub> e/ano)
2025	0,0%	0
2026	6,6%	9,6
2027	13,2%	27,9
2028	19,8%	53,9
2029	26,4%	86,8
2030	33,0%	125,6
2031	34,7%	161,3
2032	36,4%	194,9
2033	38,1%	226,3
2034	39,8%	255,2
2035	41,5%	281,7
2036	43,2%	310,1
2037	44,9%	336,7
2038	46,6%	361,6
2039	48,3%	384,6
2040	50,0%	407
2041	52,0%	422,7
2042	54,0%	437,3
2043	56,0%	450,8
2044	58,0%	463,1
2045	60,0%	474,1
2046	62,0%	483,7
2047	64,0%	491,8
2048	66,0%	498,4
2049	68,0%	503,3
2050	70,0%	506,6



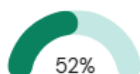
## Tecnologia : Uso de biometano em ônibus

Ano inicial: 2025  
Ano final: 2050

Redução total de emissões:  
**2,16 MtCO<sub>2</sub>e**

Valor Presente Líquido:  
**-1,24 Bilhões de R\$**

Custo Marginal de Abatimento:  
**576 R\$/tCO<sub>2</sub>e**



### Premissas técnicas:

- Lei 14.993 prevê a introdução de biometano adicionado ao gás natural com valor inicial de 1% (um por cento) e não poderá exceder a 10% (dez por cento) de redução das emissões. Além disso, foi considerado também aplicações específicas com o uso do biometano puro. Quanto ao rendimento energético foi estimado a partir dos valores apresentados pela empresa MWM, além de análises com cases similares, mas aplicados em caminhões.

### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;  
- Para o CAPEX foi considerado o investimento para adequação (retrofit) do ônibus (motor MWM do grupo Tupy) a diesel para biometano/GNV;  
- Para o OPEX foi considerada a diferença de preço do biometano e do GNV versus uso de diesel

Ano	Percentual de ônibus GNV/Biometano	Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2</sub> e/ano)
2025	0,0%	0,0
2026	2,0%	0,0
2027	4,0%	0,1
2028	6,0%	0,6
2029	8,0%	1,6
2030	10,0%	3,3
2031	11,0%	5,7
2032	12,0%	8,9
2033	13,0%	12,8
2034	14,0%	17,6
2035	15,0%	23,2
2036	16,0%	31,3
2037	17,0%	40,8
2038	18,0%	51,6
2039	19,0%	63,7
2040	20,0%	77,5
2041	20,0%	92,5
2042	20,0%	108,9
2043	20,0%	126,7
2044	20,0%	145,8
2045	20,0%	166,2
2046	20,0%	188,0
2047	20,0%	211,1
2048	20,0%	235,6
2049	20,0%	261,3
2050	20,0%	280,6



## Tecnologia : Eletrificação de caminhões

Ano inicial: 2025  
Ano final: 2050

Redução total de emissões:  
**22,72 MtCO<sub>2</sub>e**

Valor Presente Líquido:  
**18,20 Bilhões de R\$**

Custo Marginal de Abatimento:  
**-801 R\$/tCO<sub>2</sub>e**



### Premissas técnicas:

- Maior participação de licenciamento de caminhões semileves e leves elétricos a bateria. Caminhões alocados para o transporte urbano de carga (TUC), alcançando uma participação de 50% dos licenciamentos em 2050.
- O rendimento energético tem como referência dados operacionais de cases reais relatados pelo Programa de Logística Verde Brasil (PLVB)

### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- Para o CAPEX foi considerado o investimento adicional da diferença entre o valor dos veículos e da infraestrutura de recarga;
- Para o OPEX foi considerada a economia de combustível e com manutenções.

Ano	Percentual caminhões elétricos	Redução Anual de GEE (tCO <sub>2</sub> e/ano)
2025	0,0%	0
2026	6,6%	32
2027	13,2%	94
2028	19,8%	183
2029	26,4%	295
2030	20,0%	371
2031	21,3%	445
2032	22,6%	518
2033	23,9%	588
2034	25,2%	655
2035	26,5%	719
2036	27,8%	788
2037	29,1%	855
2038	30,4%	919
2039	31,7%	978
2040	33,0%	1.038
2041	34,7%	1.101
2042	36,4%	1.166
2043	38,1%	1.234
2044	39,8%	1.304
2045	41,5%	1.377
2046	43,2%	1.453
2047	44,9%	1.530
2048	46,6%	1.610
2049	48,3%	1.692
2050	50,0%	1.775



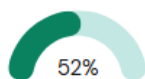
## Tecnologia : Uso de biometano em caminhões

Ano inicial: 2025  
Ano final: 2050

Redução total de emissões:  
**10,05 MtCO<sub>2</sub>e**

Valor Presente Líquido:  
**-5,80 Bilhões de R\$**

Custo Marginal de Abatimento:  
**577 R\$/tCO<sub>2</sub>e**



### Premissas técnicas:

- Lei 14.993 -prevê a introdução de biometano adicionado ao gás natural com valor inicial de 1% (um por cento) e não poderá exceder a 10% (dez por cento) de redução das emissões. Além disso, foi considerado também aplicações específicas com o uso do biometano puro. - Quanto ao rendimento energético foi considerado o consumo - O rendimento energético tem como referência dados operacionais de cases reais relatados pelo Programa de Logística Verde Brasil (PLVB)

### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;  
- Para o CAPEX foi considerado o investimento para adequação (retrofit) do caminhão (motor MWM do grupo Tupy) a diesel para biometano/GNV.  
- Para o OPEX foi considerada a diferença de preço do biometano e do GNV versus uso de diesel

Ano	Percentual caminhões a GNV/ Biometano	Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2</sub> e/ano)
2025	0,0%	0,0
2026	1,7%	-0,2
2027	3,3%	0,5
2028	5,0%	2,9
2029	6,6%	8,1
2030	5,0%	14,4
2031	6,5%	23,6
2032	8,0%	36,3
2033	9,5%	52,7
2034	11,0%	73,4
2035	12,5%	98,3
2036	14,0%	134,8
2037	15,5%	177,6
2038	17,0%	226,5
2039	18,5%	281,1
2040	20,0%	343,4
2041	21,0%	413,2
2042	22,0%	490,5
2043	23,0%	575,8
2044	24,0%	669,3
2045	25,0%	771,2
2046	26,0%	881,6
2047	27,0%	1.000,9
2048	28,0%	1.129,3
2049	29,0%	1.266,8
2050	30,0%	1.375,0



## Tecnologia : Caminhão a hidrogênio

Ano inicial: 2025

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

1,18 MtCO<sub>2e</sub>

-0,45 Bilhões de R\$

379 R\$/tCO<sub>2e</sub>

### Premissas técnicas:

-Estima-se que para o licenciamento de caminhões pesados a hidrogenio se iniciará de forma operacional a partir de 2041, alcançando 10% de participação em 2050.  
-O rendimento energético considerado de 17,3 km/kg de hidrogênio tem como referência o teste do caminhão a hidrogênio realizado pela empresa Cummins

### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;  
- Os custos gerais para o caminhão a diesel e para o caminhão a hidrogênio tiveram como base estudo do ICCT (2023) que estima o TCO para diversas tecnologias de propulsão para caminhões de diversos portes.

Ano	Percentual de caminhão a hidrogênio	Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2e</sub> /ano)
2025	0,0%	0
2026	0,0%	0
2027	0,0%	0
2028	0,0%	0
2029	0,0%	0
2030	0,0%	0
2031	0,0%	0
2032	0,0%	0
2033	0,0%	0
2034	0,0%	0
2035	0,0%	0
2036	0,0%	0
2037	0,0%	0
2038	0,0%	0
2039	0,0%	0
2040	0,0%	0
2041	1,0%	5
2042	2,0%	16
2043	3,0%	32
2044	4,0%	53
2045	5,0%	80
2046	6,0%	112
2047	7,0%	150
2048	8,0%	192
2049	9,0%	240
2050	10,0%	294



## Grupo 2 – Troca da fonte de energia para combustíveis e biocombustíveis convencionais

### Tecnologia: Aumento no uso de etanol em veículos leves

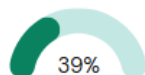
Ano inicial: 2025

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

**84,75 MtCO<sub>2</sub>e****0,97 Bilhões de R\$****-11 R\$/tCO<sub>2</sub>e**

#### Premissas técnicas:

- A mistura regulamentada de etanol anidro será aumentada de 27% para 35%;
- O market-share do etanol hidratado aumentará até alcançar uma participação de 90% no market-share frente a gasolina C;
- A diferença no rendimento energético entre etanol e gasolina foi 31,2% com base nos três carros mais vendidos no Brasil;
- A emissão biogênica de CO<sub>2</sub> foi desconsiderada para o etanol.

#### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- Os custos dos combustíveis foram estimados com base nos preços disponibilizados pela ANP (2014).

Ano	Aplicação			Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2</sub> e/ano)
	Percentual de etanol anidro adicionado à gasolina comum	Market-share etanol hidratado em veículos leves	Market-share etanol hidratado em veículos comerciais	
2025	27,0%	38,0%	37,0%	0
2026	27,3%	40,0%	39,0%	192
2027	27,6%	41,0%	40,0%	385
2028	28,0%	43,0%	42,0%	688
2029	28,3%	45,0%	44,0%	1.001
2030	28,6%	46,0%	46,0%	1.322
2031	28,9%	48,0%	47,0%	1.647
2032	29,2%	50,0%	49,0%	1.976
2033	29,6%	51,0%	51,0%	2.304
2034	29,9%	53,0%	52,0%	2.629
2035	30,2%	55,0%	54,0%	2.949
2036	30,5%	56,0%	56,0%	3.178
2037	30,8%	58,0%	58,0%	3.401
2038	31,2%	60,0%	59,0%	3.618
2039	31,5%	61,0%	61,0%	3.825
2040	31,8%	63,0%	63,0%	4.031
2041	32,1%	65,0%	65,0%	4.236
2042	32,4%	67,0%	66,0%	4.442
2043	32,8%	68,0%	68,0%	4.647
2044	33,1%	70,0%	70,0%	4.853
2045	33,4%	72,0%	71,0%	5.058
2046	33,7%	73,0%	73,0%	5.263
2047	34,0%	75,0%	75,0%	5.469
2048	34,4%	77,0%	77,0%	5.674
2049	34,7%	78,0%	78,0%	5.881
2050	35,0%	80,0%	80,0%	6.087



## Tecnologia: Aumento do uso de biodiesel em ônibus

Ano inicial: 2025

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

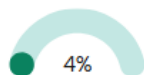
Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

**3,38 MtCO<sub>2</sub>e**

**-0,24 Bilhões de R\$**

**72 R\$/tCO<sub>2</sub>e**



### Premissas técnicas:

- A mistura regulamentada de biodiesel terá um aumento de 1% a.a. até alcançar a adição de 20% no diesel (B20) em 2030, similar ao cenário base;
- A partir do Conselho Nacional de Política Energética, estima-se que a mistura será B25 entre 2035 e 2050.

### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O custo do acréscimo no preço do diesel com o aumento da mistura regulamentada foi estimado com base nos preços disponibilizados pela ANP (2024)

Ano	Percentual de biodiesel adicionado ao diesel	Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2</sub> e/ano)
2025	15,0%	0
2026	16,0%	0
2027	17,0%	0
2028	18,0%	0
2029	19,0%	0
2030	20,0%	0
2031	21,0%	42
2032	22,0%	84
2033	23,0%	126
2034	24,0%	167
2035	25,0%	207
2036	25,0%	205
2037	25,0%	203
2038	25,0%	201
2039	25,0%	198
2040	25,0%	193
2041	25,0%	190
2042	25,0%	187
2043	25,0%	184
2044	25,0%	181
2045	25,0%	178
2046	25,0%	175
2047	25,0%	171
2048	25,0%	167
2049	25,0%	164
2050	25,0%	157



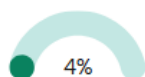
## Tecnologia : Aumento do uso de biodiesel em caminhões

Ano inicial: 2025  
Ano final: 2050

Redução total de emissões:  
**14,8 MtCO<sub>2</sub>e**

Valor Presente Líquido:  
**-1,07 Bilhões de R\$**

Custo Marginal de Abatimento:  
**72 R\$/tCO<sub>2</sub>e**



### Premissas técnicas:

- A mistura regulamentada de biodiesel terá um aumento de 1% a.a. até alcançar a adição de 20% no diesel (B20) em 2030; A partir do Conselho Nacional de Política Energética, estima-se que a mistura será B25 entre 2035 e 2050;
- Além disso, uso de biodiesel puro foi autorizado pela ANP e vem sendo utilizado em parte da frota de empresas como a Potencial e da JBS B18

### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O custo do acréscimo no preço do diesel com o aumento da mistura regulamentada foi estimado com base nos preços disponibilizados pela ANP (2024)

Ano	Percentual de biodiesel adicionado ao diesel	Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2</sub> e/ano)
2025	15,0%	0,0
2026	16,0%	0,0
2027	17,0%	0,0
2028	18,0%	0,0
2029	19,0%	0,0
2030	20,0%	0,0
2031	21,0%	179,5
2032	22,0%	360,9
2033	23,0%	542,7
2034	24,0%	723,6
2035	25,0%	902,2
2036	25,0%	897,6
2037	25,0%	890,8
2038	25,0%	882,0
2039	25,0%	871,3
2040	25,0%	849,0
2041	25,0%	836,9
2042	25,0%	824,2
2043	25,0%	811,0
2044	25,0%	797,1
2045	25,0%	782,6
2046	25,0%	767,6
2047	25,0%	751,9
2048	25,0%	735,8
2049	25,0%	719,0
2050	25,0%	690,9



## Grupo 3 – Troca da fonte de energia para biocombustíveis avançados

### Tecnologia : Uso de HVO em ônibus

Ano inicial: 2025

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

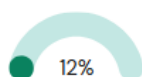
Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

**9,47 MCO<sub>2e</sub>**

**-7,67 Bilhões de R\$**

**810 R\$/tCO<sub>2e</sub>**



#### Premissas técnicas:

- A mistura do HVO (diesel verde) no diesel segue o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), que prevê ano a ano a participação volumétrica mínima obrigatória de diesel verde;
- Além disso, optou-se por considerar o limite inferior da mistura (30%) observado na revisão documental (Tabela 1).

#### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- Para o custo foi considerado que o preço do HVO em relação ao diesel mineral, é 250% mais caro no início do período analisado e 100% mais caro ao fim do horizonte de análise, com redução de preço considerando a curva de aprendizado e ganhos de escala.

Ano	Percentual de HVO adicionado ao diesel	Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2e</sub> /ano)
2025	0,0%	0
2026	0,0%	0
2027	0,0%	0
2028	0,0%	0
2029	0,0%	0
2030	0,0%	0
2031	1,0%	42,2
2032	2,0%	84,1
2033	3,0%	125,7
2034	4,0%	166,6
2035	5,0%	206,7
2036	6,0%	245,9
2037	7,0%	284
2038	8,0%	320,9
2039	9,0%	356,6
2040	10,0%	386,1
2041	12,0%	456,7
2042	14,0%	524,8
2043	16,0%	590,1
2044	18,0%	652,4
2045	20,0%	711,8
2046	22,0%	767,9
2047	24,0%	820,7
2048	26,0%	869,9
2049	28,0%	915,5
2050	30,0%	942,6



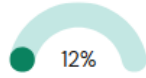
### Tecnologia : Uso de HVO em caminhões

Ano inicial: 2025  
Ano final: 2050

Redução total de emissões:  
**41,6 MtCO<sub>2</sub>e**

Valor Presente Líquido:  
**-33,62 Bilhões de R\$**

Custo Marginal de Abatimento:  
**808 R\$/tCO<sub>2</sub>e**



**Premissas técnicas:**

A mistura do HVO (diesel verde) no diesel segue o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), que prevê ano a ano a participação volumétrica mínima obrigatória de diesel verde;. Além disso, optou-se por considerar o limite inferior da mistura (30%) observado na revisão documental (Tabela 1)

**Premissas financeiras:**

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- Para o custo foi considerado que o preço do HVO em relação ao diesel mineral, é 250% mais caro no início do período analisado e 100% mais caro ao fim do horizonte de análise, com redução de preço considerando a curva de aprendizado e ganhos de escala.

Ano	Percentual de HVO adicionado ao diesel	Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2</sub> e/ano)
2025	0,0%	0
2026	0,0%	0
2027	0,0%	0
2028	0,0%	0
2029	0,0%	0
2030	0,0%	0
2031	1,0%	180
2032	2,0%	361
2033	3,0%	543
2034	4,0%	724
2035	5,0%	902
2036	6,0%	1.077
2037	7,0%	1.247
2038	8,0%	1.411
2039	9,0%	1.568
2040	10,0%	1.698
2041	12,0%	2.009
2042	14,0%	2.308
2043	16,0%	2.595
2044	18,0%	2.870
2045	20,0%	3.130
2046	22,0%	3.377
2047	24,0%	3.609
2048	26,0%	3.826
2049	28,0%	4.027
2050	30,0%	4.145



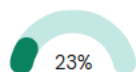
## Tecnologia : Substituição do querosene de aviação por SAF

Ano inicial: 2025  
Ano final: 2050

Redução total de emissões:  
**4,94 MtCO<sub>2</sub>e**

Valor Presente Líquido:  
**-3,15 Bilhões de R\$**

Custo Marginal de Abatimento:  
**638 R\$/tCO<sub>2</sub>e**



### Premissas técnicas:

Início da mistura regulamentada de 1% a partir de 2027, chegando em 10% em 2036 e 20% em 2050, estando parcialmente em linha com a Lei 14.993 e com as metas do CORSIA. No entanto, a mistura regulamentada considerada é consideravelmente inferior ao limite superior (90%) observado na Tabela 1.

### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O custo do SAF foi considerado, com base na revisão da literatura. Quando comparado ao querosene de aviação, é considerado 250% mais caro no início do período analisado e 100% mais caro ao fim do horizonte de análise, com redução de preço a partir da curva de aprendizado e ganhos de escala.

Ano	Percentual de SAF adicionado ao querosene	Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2</sub> e/ano)
2025	0%	0
2026	0%	0
2027	1%	8
2028	2%	16
2029	3%	24
2030	4%	32
2031	5%	40
2032	6%	48
2033	7%	57
2034	8%	65
2035	9%	74
2036	10%	83
2037	14%	113
2038	17%	143
2039	21%	174
2040	24%	206
2041	28%	238
2042	31%	270
2043	35%	302
2044	39%	335
2045	42%	368
2046	46%	401
2047	49%	435
2048	53%	469
2049	56%	503
2050	60%	538



## Grupo 4 – Ampliação da infraestrutura de modos de alta capacidade

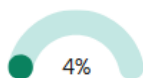
### Tecnologia : Mudança de modal

Ano inicial: 2025  
Ano final: 2050

Redução total de emissões:  
**4,96 MtCO<sub>2</sub>e**

Valor Presente Líquido:  
**-0,78 Bilhões de R\$**

Custo Marginal de Abatimento:  
**157,01 R\$/tCO<sub>2</sub>e**



#### Premissas técnicas:

- Transição do uso do modal rodoviário, fluxo de caminhões semipesados e pesados, para o modal ferroviário. Em linha com o PDMG e considerando que já há uma transição do uso do modal rodoviário para o ferroviário no cenário base, estima-se uma transição adicional do uso do modal rodoviário para o ferroviário em cerca de 10%.

#### Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;  
- O CAPEX foi estimado com base nas estimativas do PNL da Infra S.A.;  
- Para o OPEX foi considerada a economia de combustível devido à mudança modal.

Ano	Participação do modo ferroviário na matriz de transporte (%)	Redução Anual de GEE (ktCO <sub>2</sub> e/ano)
2025	0,0%	0,0
2026	0,0%	0,0
2027	0,0%	0,0
2028	0,0%	0,0
2029	0,0%	0,0
2030	0,0%	0,0
2031	0,5%	19,6
2032	1,0%	38,8
2033	1,5%	57,4
2034	2,0%	75,4
2035	2,5%	92,6
2036	3,0%	110,3
2037	3,5%	127,5
2038	4,0%	144,0
2039	4,5%	159,6
2040	10,0%	349,4
2041	10,5%	355,7
2042	11,0%	360,9
2043	11,5%	365,0
2044	12,0%	368,1
2045	12,5%	370,1
2046	13,0%	371,1
2047	13,5%	371,0
2048	14,0%	369,8
2049	14,5%	367,5
2050	20,0%	485,6





## **Bruna Araújo**

bruna.araujo@waycarbon.com

## **Carolina Souza**

carolina.souza@waycarbon.com

## **Daniel Schmitz**

daniel.schmitz.jf@gmail.com

## **Laise Mondo**

laise.mondo@waycarbon.com

## **Letícia Gavioli**

leticia.gavioli@waycarbon.com

## **Luiza Oliveira**

luiza.oliveira@waycarbon.com

## **Nathalia Pereira**

nathalia.pereira@waycarbon.com

## **Rafaella Pinesi Gilberti**

rafaella.pinesi@waycarbon.com

