

RELATÓRIO DE EXECUÇÃO DO OBJETO

P2.2 – CENÁRIOS DE DESCARBONIZAÇÃO TRANSPORTE

Referência: INVESTMINAS/CT/25/2024

Este relatório compõe o Produto 2.2 – Cenários de Descarbonização Transporte, conforme previsto na Cláusula 6.^a do Contrato INVESTMINAS/CT/25/2024. O objeto foi executado em sua integralidade no período de outubro de 2024 a janeiro de 2025, incluindo revisões e ajustes até julho de 2025.



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

Cenários de Descarbonização – Transporte



Sumário

ACRÔNIMOS.....	5
INTRODUÇÃO.....	7
CONTEXTUALIZAÇÃO	8
ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	10
Cenário Base	11
Cenário <i>Net Zero</i>	13
METODOLOGIA APLICADA E RESULTADOS.....	15
Cenário Base	16
<i>Bottom-up</i> – rodoviário.....	16
<i>Top-down</i> – ferroviário e aéreo	22
Avaliação do Cenário Base.....	26
Cenário <i>Net Zero</i>	27
Plano de Descarbonização de Minas Gerais (PDMG).....	27
DDS (DDP <i>Initiative</i>).....	28
NGFS (GCAM).....	29
SBTi.....	30
Avaliação dos Cenários <i>Net Zero</i>	30
DESTAQUES E PRÓXIMOS PASSOS	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35



Índice de figuras

Figura 1: Curvas ilustrativas dos Cenários Base, <i>Net Zero</i> e Rota.....	11
Figura 2: Fluxo lógico generalista da metodologia bottom-up	12
Figura 3: Fluxo lógico generalista da metodologia top-down.....	12
Figura 4: Representatividade dos modais nas emissões do setor de transporte	15
Figura 5: Metodologia <i>bottom-up</i> para o modal rodoviário – estruturação do histórico.....	17
Figura 6: Metodologia <i>bottom-up</i> para o modal rodoviário – projeções	17
Figura 7: Metodologia top-down – ferroviário	23
Figura 8: Metodologia top-down – aéreo.....	24
Figura 9: Evolução das emissões de GEE no Cenário Base por combustível.....	26
Figura 10: Evolução das emissões de GEE no Cenário Base por modal	26
Figura 11: Trajetória de emissões nos cenários avaliados em relação ao ano-base	32
Figura 12: Trajetória de emissões nos cenários avaliados	32

Índice de tabelas

Tabela 1: Funções de sucateamento e parâmetros.....	18
Tabela 2: Função de sucateamento para motocicletas.....	19
Tabela 3: Estimativa da frota das locadoras.....	20
Tabela 4: Variáveis de projeção	21
Tabela 5: Projeção de consumo de combustível no modal rodoviário (10^3 m ³).....	21
Tabela 6: Projeção de emissões do modal rodoviário (10^3 tCO ₂ e)	22
Tabela 7: Variáveis de projeção	24
Tabela 8: Projeção de consumo de combustível no modal ferroviário e no modal aéreo (10^3 m ³).....	25
Tabela 9: Emissões do modal ferroviário e no modal aéreo (ktCO ₂ e).....	25
Tabela 10: Cenário PDMG	28
Tabela 11: Cenário DDS – (DDP Initiative).....	28
Tabela 12: Cenário NGFS.....	29
Tabela 13: Cenário SBTi	30

Índice de quadros

Quadro 1: Características dos Cenários Net Zero.....	31
--	----



ACRÔNIMOS

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

AFOLU – Agropecuária, Floresta e Outros Usos da Terra

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

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)

CDP – *Carbon Disclosure Project*

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

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

EFVM – Estrada de Ferro Vitória a Minas

FCA – Ferrovia Centro Atlântica

FGV – Fundação Getúlio Vargas

FJP – Fundação João Pinheiro

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

GEE – Gases de efeito estufa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBTS – Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável

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

IMACLIM – *Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect*

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

MMA – Ministério do Meio Ambiente



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

NGFS – *Network for Greening the Financial System*

PDMG – Plano de Descarbonização de Minas Gerais

PIB – Produto Interno Bruto

P-KM – Passageiro-Quilômetro

PLAC-MG – Plano de Ação Climática de Minas Gerais

RMC – Corporação de Gestão Ferroviária

SBTi – *Science Based Targets Initiative*

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

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

T-KM – Tonelada-Quilômetro

TKU – Tonelada Quilômetro Útil

UK – *United Kingdom*

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 no estado de Minas Gerais, compondo o *roadmap* setorial em desenvolvimento no âmbito do projeto Rota. Para cumprir esse propósito, o documento está organizado em quatro seções:

Seção 1: traz uma breve contextualização do projeto Rota;

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

Seção 3: detalha as premissas e modelagens utilizadas para o cálculo das emissões para os modais rodoviário, ferroviário e aéreo no Cenário Base, estruturado em subseções. O Cenário *Net Zero* também é apresentado em subseções, que descrevem as abordagens adotadas na construção dos cenários analisados;

Seção 4: retoma os objetivos das etapas do projeto, destaca os principais resultados deste produto e como eles se conectam com as próximas fases da construção do *roadmap* do Rota.

Cabe destacar que este é um dos quatro relatórios que compõem o Produto 2.2. Serão desenvolvidos relatórios de cenários de descarbonização também para os setores de Energia; Indústria; e Agropecuária, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU).



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: Transporte; Energia; Indústria e AFOLU. Suas etapas incluem:

- elaboração de diagnósticos setoriais;
- construção de cenários de descarbonização;
- mapeamento e priorização das principais soluções tecnológicas, por meio da construção da Curva de Custo Marginal de Abatimento (MACC, na sigla em inglês);¹
- 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 de referência *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*).

Esses cenários servirão 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. Importante destacar que a elaboração da MACC, etapa 3 do projeto, auxiliará na identificação 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

¹ A Curva MAC é uma ferramenta que permite o ranqueamento das iniciativas de descarbonização em termos de custo-efetividade.



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.

Como ressaltado anteriormente, o presente estudo concentra-se nos cenários Base e *Net Zero*. Na próxima etapa, será elaborado um documento intitulado “Necessidades e Oportunidades de Investimento”, no qual será apresentado um compilado abrangente do Cenário Rota, já calibrado de forma intersetorial. Esse cenário será adicionado aos analisados nesta etapa, tendo em vista como esses cenários interagem entre si.



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).

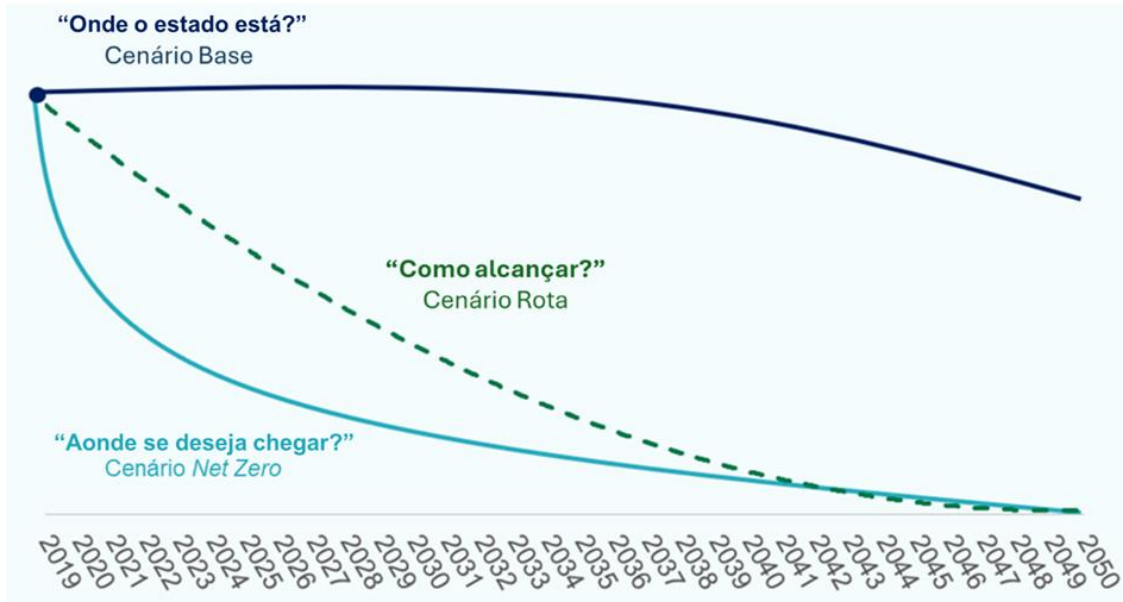
Dessa forma, a construção de cenários de descarbonização constitui uma das principais etapas para o desenvolvimento de planos de descarbonização. Para o projeto Rota, são utilizados três cenários em conjunto, representados na Figura 1.

- 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.

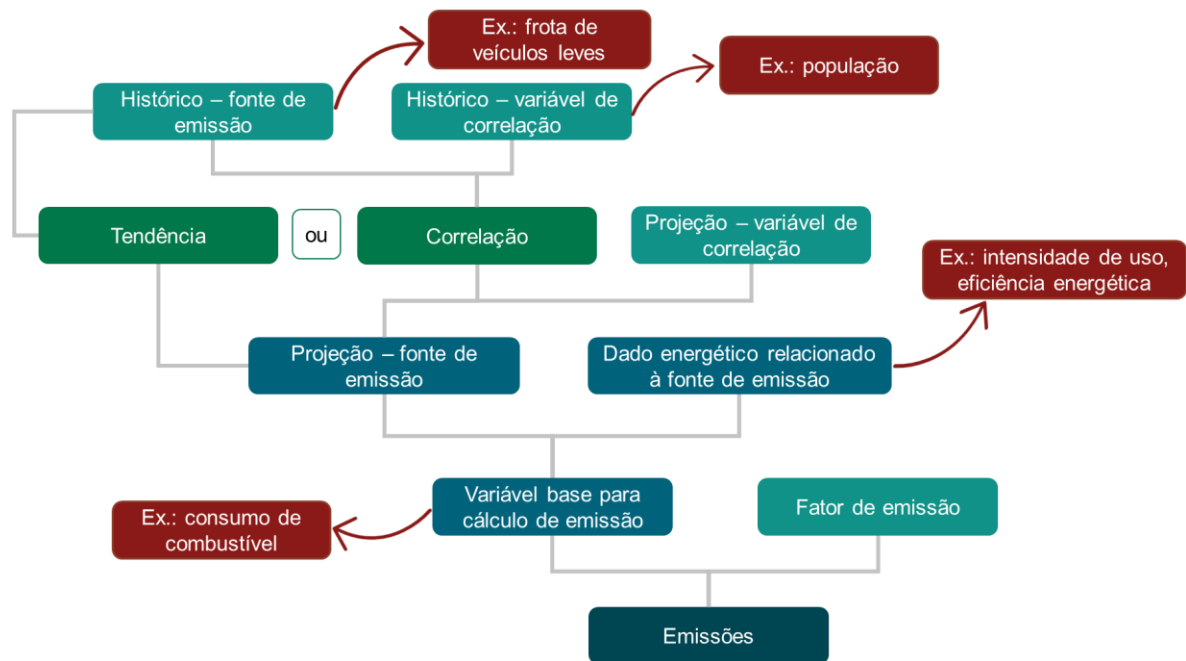
A seguir serão apresentadas as metodologias utilizadas para definir os Cenários Base e *Net Zero*.

Cenário Base

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

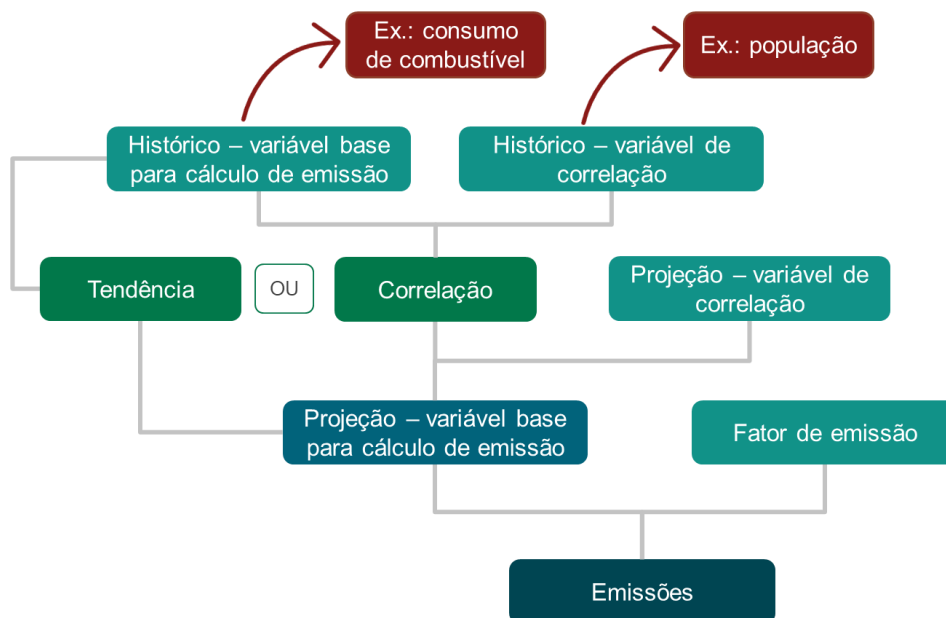
Segundo GRUBB *et al.* (1993), a metodologia *bottom-up* (Figura 2) apresenta um nível de detalhamento maior, partindo das tecnologias vigentes para estimar as emissões. Em vez de considerar apenas certos indicadores (macroeconômicos, demográficos e de outros tipos), essa modelagem se baseia em dados 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 transportes, 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 CO₂ 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 carbono² 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.

A próxima seção apresenta os resultados deste estudo para o Cenários Base e *Net Zero*.

² 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 CO₂ de origem biológica, contribuindo para um balanço negativo de emissões – ou seja, remoções líquidas de carbono da atmosfera.



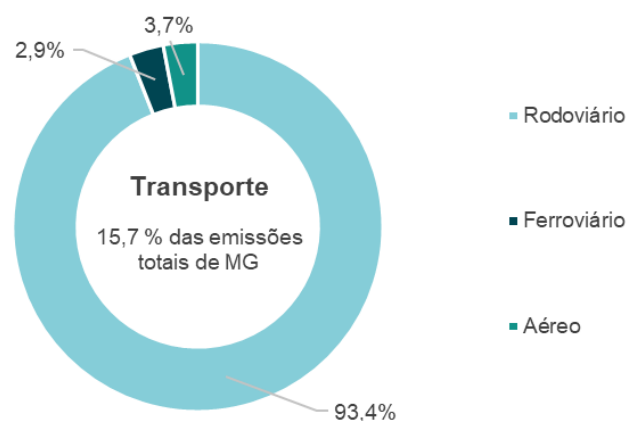
METODOLOGIA APLICADA E RESULTADOS

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 4. 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 4: 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.

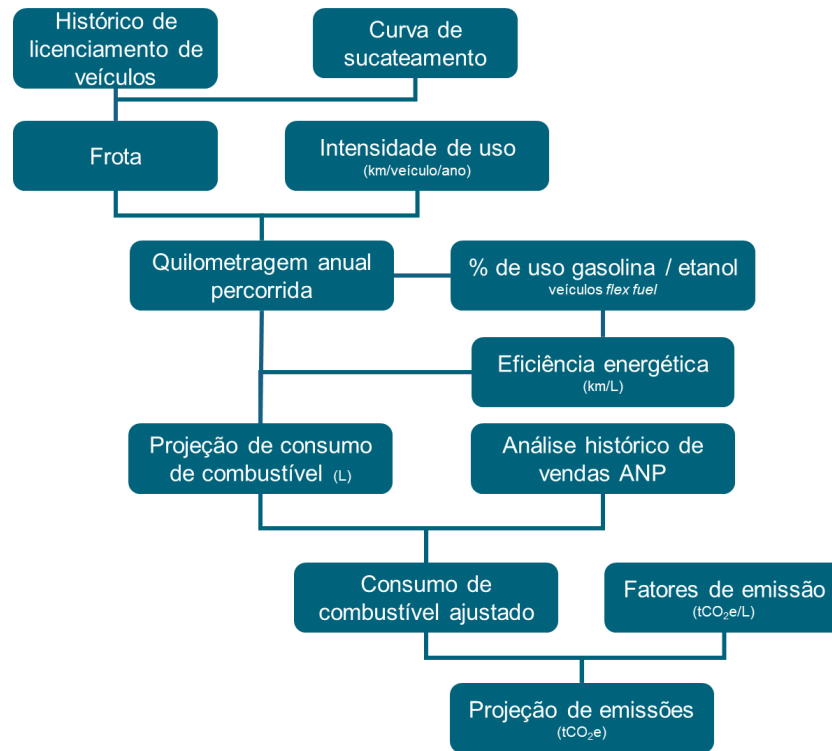
De modo geral, a modelagem utilizada no PDMG considerou análises setoriais a partir de um processo de *downscaling*, refinando projeções nacionais para o contexto de Minas Gerais. Ainda, integra oferta e demanda para otimizar a relação custo-efetividade das tecnologias de mitigação. Para a construção 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 5. 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 6. Essa metodologia em duas fases permite uma transição coerente entre a análise retrospectiva e as projeções, garantindo robustez metodológica ao estudo.

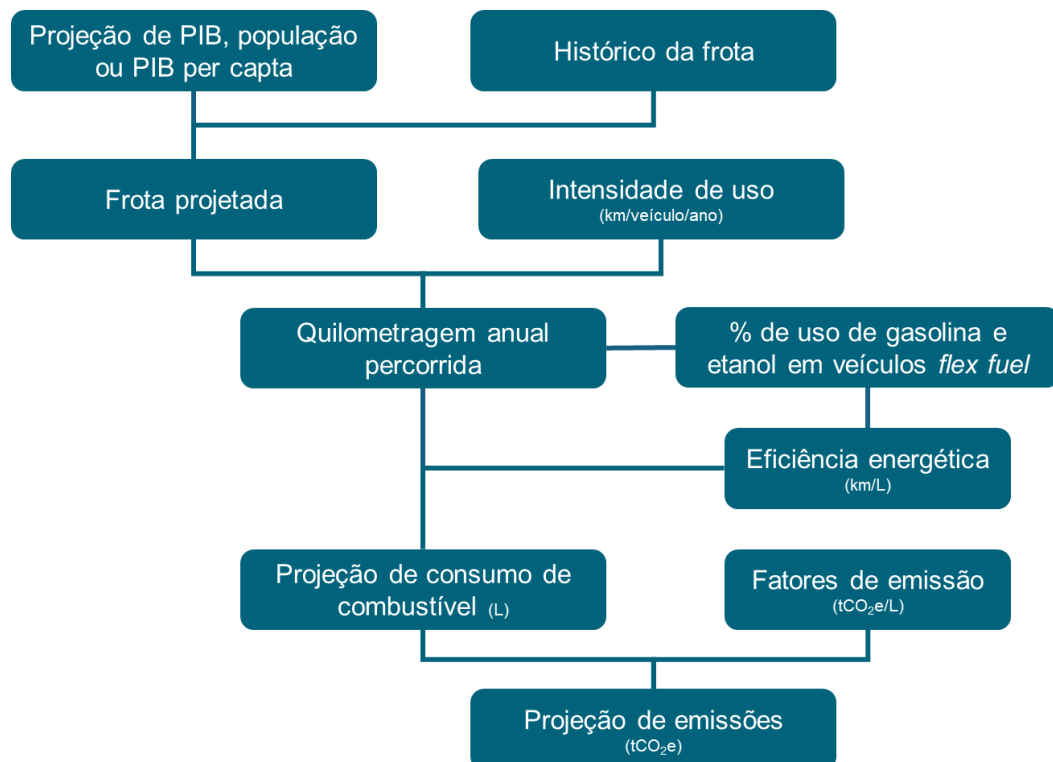


Figura 5: Metodologia *bottom-up* para o modal rodoviário – estruturação do histórico



Fonte: Elaboração própria.

Figura 6: 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^3 e t_0^4
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 sobrevivência⁵ 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)

³ No caso da função Gompertz.

⁴ No caso da função logística.

⁵ 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),⁶ 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	Exponencial	Exponencial	Linear	Linear
	$y = a \cdot e^{(b \cdot x)}$	$y = a \cdot e^{(b \cdot x)}$	$y = a \cdot e^{(b \cdot x)}$	$y = ax + b$	$y = ax + b$
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.

Tabela 5: Projeção de consumo de combustível no modal rodoviário (10^3 m^3)

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

⁶ 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.



Descritivo	Combustível	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
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 (10³ tCO₂e)

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-km⁷ e TKU⁸), 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 para as aeronaves, as emissões foram projetadas a partir do consumo de combustível, com base em dados históricos informados pelo setor.

⁷ 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.

⁸ Tonelada Quilômetro Útil (TKU, na sigla em inglês): é determinado pela multiplicação da tonelada útil de carga transportada multiplicada pela distância média percorrida.

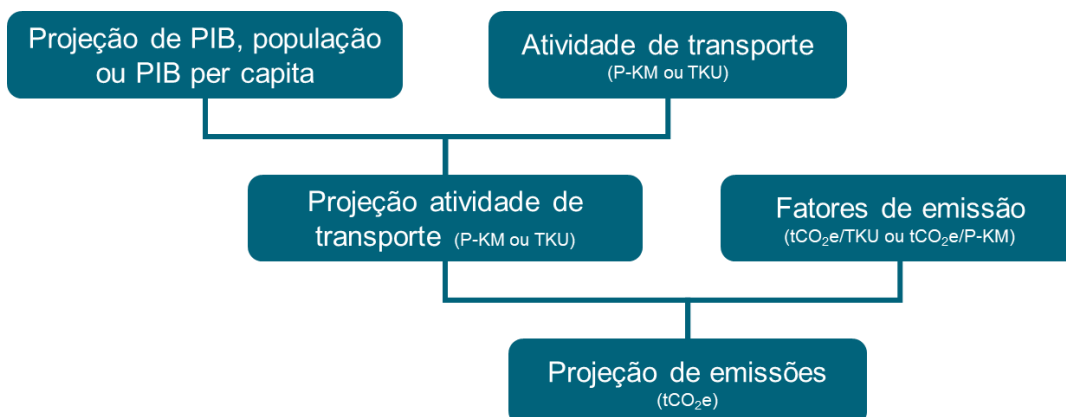


Os cálculos das emissões de GEE do modal ferroviário partem da atividade de transporte nas ferrovias do estado de Minas Gerais, como listadas a seguir:

- 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 7 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.

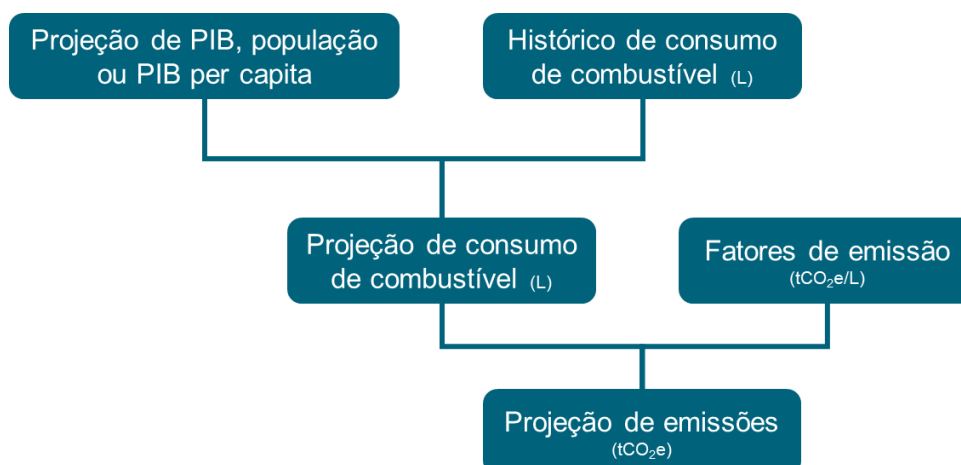
Figura 7: Metodologia *top-down* – ferroviário



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 8.



Figura 8: 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),⁹ 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	Ferroviário (TKU)	Ferroviário (P-km)	Aéreo (L)
Equação	Linear $y=ax+b$	Linear $y=ax+b$	Logarítmico $y=a\ln(x)+b$
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.

⁹ 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 tCO₂e/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 tCO₂, 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 tCO₂e/m³, 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 (10³ m³)

Modal	Combustível	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferroviário (carga)	Diesel	673	913	940	954	957	957	957
Ferroviário (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 (ktCO₂e)

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

Fonte: Elaboração própria.

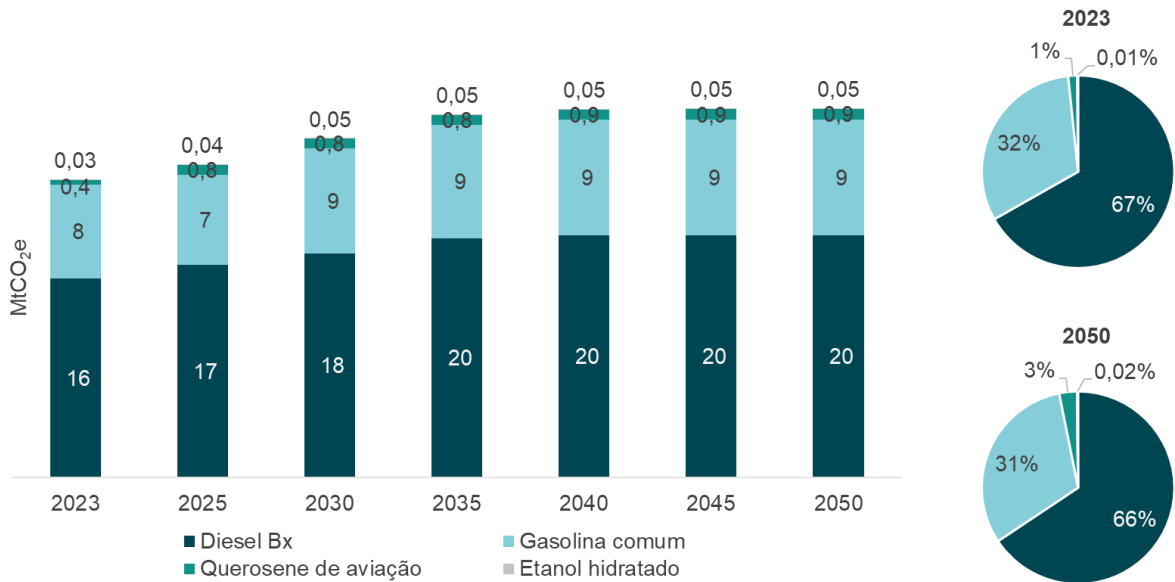
Em síntese, para o modal ferroviário, parte-se diretamente da atividade histórica de transporte em TKU, estabelecendo-se uma correlação com o crescimento populacional para projetar a demanda futura. Uma vez estimada a atividade de transporte, aplicam-se os fatores de emissão correspondentes para calcular 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

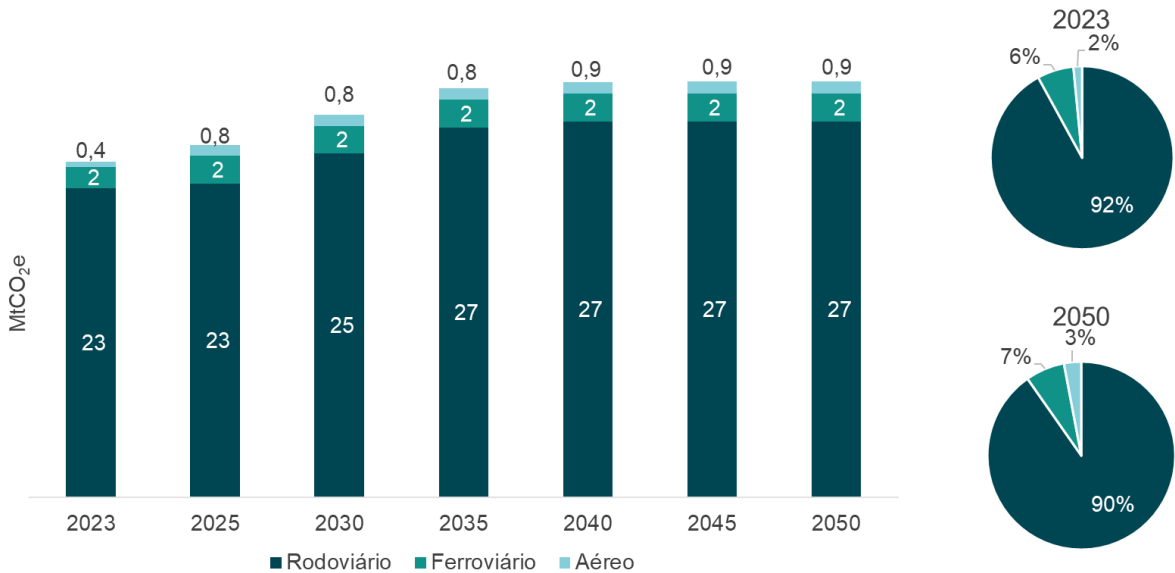
Os resultados obtidos por meio da aplicação das metodologias *bottom-up* e *top-down* sintetizados são ilustrados na Figura 9 e na Figura 10, por combustível e por modal, respectivamente.

Figura 9: Evolução das emissões de GEE no Cenário Base por combustível



Fonte: Elaboração própria.

Figura 10: Evolução das emissões de GEE no Cenário Base por modal



Fonte: Elaboração própria.



Observa-se na Figura 9, 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 10, 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 Absoluta¹⁰ 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 MtCO₂e emitidos 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.

¹⁰ 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.



Tabela 10: Cenário PDMG

Ano	Emissões (MtCO _{2e})	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 COPPE-UFRJ; UFMG; USP (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_{2e} 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 _{2e})	Percentual de redução em relação ao ano-base (%) ¹¹
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).

¹¹ Reduções negativas indicam aumento das emissões em relação ao ano-base.



NGFS (GCAM)

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 NGFS¹² 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 MtCO₂e/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 ₂ 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 (2024).

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.

¹² 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).



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 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 ₂ e)	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 transportes 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)	✓	✗	✓	✓
DDS – (DDP Initiative)	✓	✗	✓	✗
SBTI (IEA)	✗	✗	✗	✗

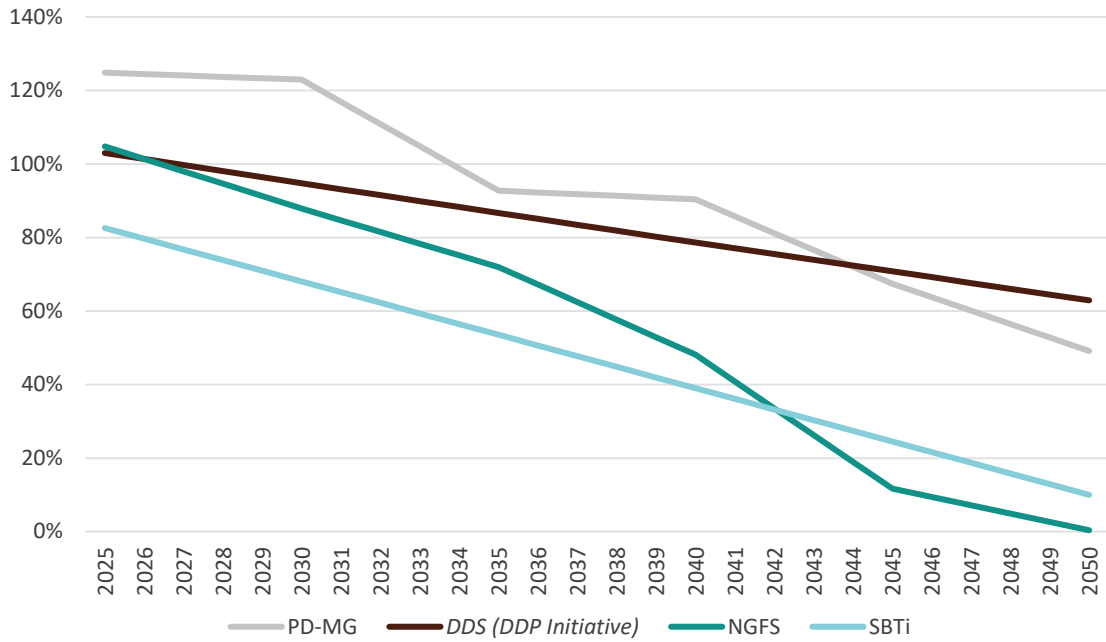
Fonte: Elaboração própria.

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



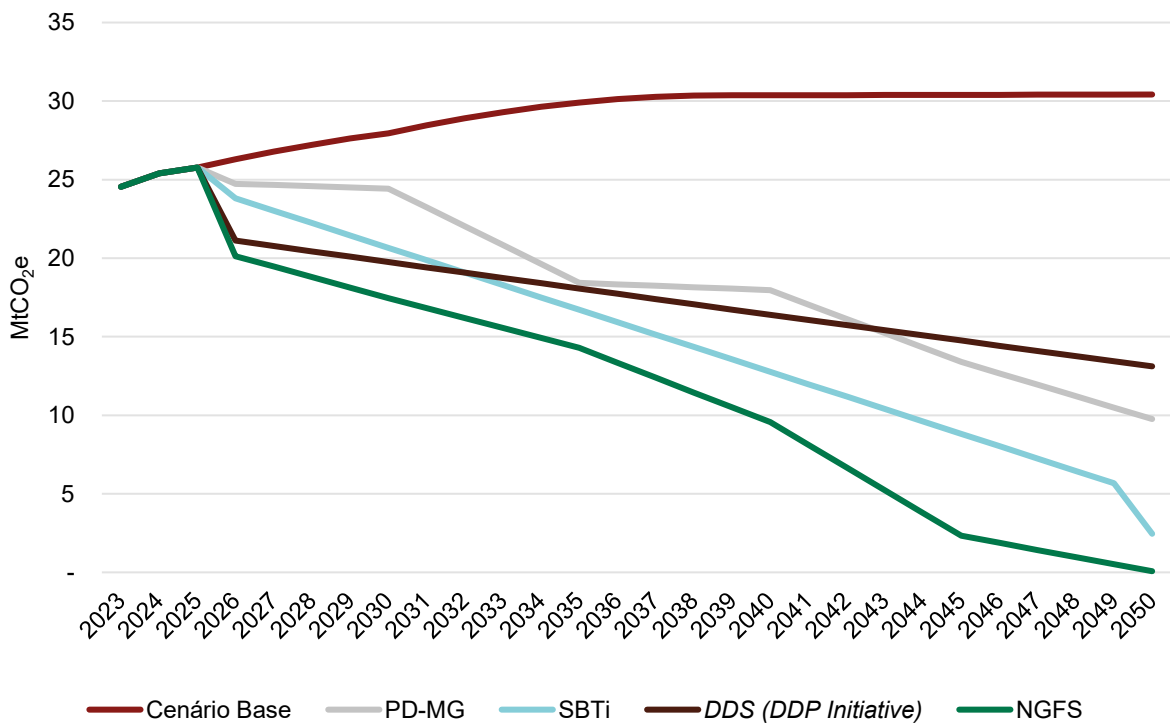
Figura 11: Trajetória de emissões nos cenários avaliados em relação ao ano-base



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 12.

Figura 12: 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. Assim, o próximo produto deste projeto avaliará as tecnologias de descarbonização disponíveis e, considerando os quatro setores do Rota, definirá a forma mais custo-efetiva de alcançar o *Net Zero* no estado.



DESTAQUES E PRÓXIMOS PASSOS

Com base nas análises descritas neste relatório, foi possível elaborar uma projeção para as emissões do setor de transporte de Minas Gerais, caso nenhuma medida adicional de descarbonização seja implementada, e realizar um comparativo com os principais cenários climáticos desenvolvidos para o setor no Brasil e no mundo.

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. Foi possível observar que, enquanto no Cenário Base as emissões apresentavam um crescimento de 24%, os Cenários *Net Zero* indicam que é necessária uma redução entre 46,58% e 99,70% das emissões em 2050, em relação a 2023.

Com o desafio identificado, os próximos produtos do projeto apresentarão os potenciais de redução de emissão e os custos das tecnologias mapeadas no Diagnóstico Setorial, subsidiando assim a construção do Cenário Rota. Esse cenário requer uma avaliação conjunta de todos os setores, resultando em uma trajetória *Net Zero* para Minas Gerais.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANFAVEA (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES). **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2022**. 2022. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/anuario2022/anuario.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2025.

ANTT. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas do Transporte Ferroviário de Cargas**. 2012. Disponível em: https://cmsdespoluir.cnt.org.br/Documents/PDFs/invent%C3%A1rio%20ferrovi%C3%A1rio%202012_final.pdf. Acesso em: 13 dez. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Contribuição Nacionalmente Determinada – NDC**. Brasília, 2015.

BRASIL. Ministério das Cidades; Ministério dos Transportes. **Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima (PSTM)**. Brasília, 2013. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSEMOB/Biblioteca/PSTM.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: ano-base 2012**. Brasília, 2014. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviarios_2013.pdf. Acesso em: 6 jan. 2025.

BRASIL. **Presidente Lula sanciona Lei do Combustível do Futuro para promover a mobilidade sustentável**. 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.

COPPE-UFRJ;UFMG;USP. **Plano de descarbonização para o Estado de Minas Gerais dentro de um Brasil clima neutro em 2050**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2023/09/plano-descarbonizacao-minasgerais-coppe-ppe-feam.pdf>. Acesso em: 20 set. 2024.

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

DDP Initiative (2023). ECW BIICS Data. Disponível em: <https://ddpinitiative.org/ecw-biics-data/>. Acesso em: 6 jan. 2025.

Fundação Getúlio Vargas (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 09 jan. 2025

Fundação João Pinheiro (FJP). Centro de Estatística e Informações. **2024.09.12_Anexo Estatístico – PIB mg 2 trim 2024**. Belo Horizonte: FJP, 2024a. Disponível em: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1oBXEdWqriSUPbV5oJhIqKmr1TOwJ4skB/edit?gid=1534330172#gid=1534330172>. Acesso em: 6 jan. 2025.

Fundação João Pinheiro (FJP). Centro de Estatística e Informações. **Informativo CEI: retroplação da série do PIB de Minas Gerais/1995:2007**. Belo Horizonte: FJP, 2009. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.mg.gov.br/consulta/consultaDetalheDocumento.php?iCodDocumento=73471>. Acesso em: 6 jan. 2025.

Fundação João Pinheiro (FJP). Centro de Estatística e Informações. **PIB dos municípios de Minas Gerais – 2010 a 2021**. Belo Horizonte: FJP, 2024b. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNWl1OTZmNDUtZDAzZS00ZWl4LTlmZDYtN2NhZTc1MDNIYzI4IiwidCI6IjA5ZGY3MWFILWQ2YzUtNGFkYi1iMjVjLTlkMmRjZDQwMWFjMiJ9>. Acesso em: 6 jan. 2025.

D. N. S.; GONÇALVES, D. N. S.; GOES, G. V.; D'AGOSTO, M. A. **Panorama e cenários prospectivos para atendimento da Contribuição Nacionalmente Determinada**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável (IBTS), 2019. Disponível em: https://ibts.eco.br/src/uploads/2019/12/transportes-no-brasil_relatorio-de-referencia.pdf. Acesso em: 6 jan. 2025.

GRUBB, M.; EDMONDS, J.; BRINK, P.; MORRISON, M. **The costs of limiting fossil-fuel CO₂ emissions: a survey and analysis**. Annual Review of Energy and the environment, 18(1), 397-478. 1993. DOI: 10.1146/annurev.energy.18.1.397

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2000: publicações**. Rio de Janeiro: IBGE, 2000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/administracao-publica-e-participacao-politica/9663-censo-demografico-2000.html?=&t=publicacoes>. Acesso em: 6 jan. 2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Minas Gerais: **Panorama**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama>. Acesso em: 6 jan. 2025.

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

Laboratório Cenergia/PPE/COPPE/UFRJ. **Plano de descarbonização para o Estado de Minas Gerais dentro de um Brasil clima neutro em 2050**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2023/09/plano-descarbonizacao-minasgerais-coppe-ppe-feam.pdf>. Acesso em: 20 set. 2024.

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



Network For Greening The Financial System (NGFS). **NGFS Scenarios for central banks and supervisors.** [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/ngfs_climate_scenarios_for_central_banks_and_supervisors_.pdf. Acesso em: 12 dez. 2024.

Network For Greening The Financial System (NGFS). **NGFS Scenarios for Central Banks and Supervisors.** 2024. Disponível em: https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/ngfs_scenarios_main_presentation_.pdf. Acesso em: 30 dez. 2024.

SBTi. Science Based Targets Initiative. **SBTi Corporate Net-Zero Standard Criteria.** 2024. Disponível em: <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/Net-Zero-Standard-Criteria.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2025.

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

United Kingdom (UK). Department for Energy Security and *Net Zero*. **Conversion factors 2024: full set (for advanced users).** 2024. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6722567487df31a87d8c497e/ghg-conversion-factors-2024-full_set_for_advanced_users__v1_1.xlsx. Acesso em: 09 jan. 2024.



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

