

# RELATÓRIO DE EXECUÇÃO DO OBJETO

## *P2.1 – DIAGNOSTICO SETORIAL TRANSPORTE*

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

Este relatório é composto pelo Produto 2.1 – Diagnóstico Setorial Transporte, conforme previsto na Cláusula 6ª do Contrato INVESTMINAS/CT/25/2024. O objeto foi executado em sua integridade durante o período de setembro a novembro de 2024, incluindo revisões e ajustes em fevereiro de 2025.



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

*Diagnóstico Setorial – Transporte*



 INVEST  
MINAS

 WAY CARBON

# Sumário

ACRÔNIMOS.....	5
INTRODUÇÃO.....	7
CONTEXTUALIZAÇÃO .....	8
Desafios e oportunidades da agenda climática no Brasil e em Minas Gerais .....	8
Enfrentamento dos desafios climáticos em Minas Gerais.....	11
DIAGNÓSTICO SETORIAL – TRANSPORTE .....	15
Contextualização sobre as emissões do setor em Minas Gerais.....	16
Benchmarking das tecnologias previstas nos planos estaduais de descarbonização .....	19
O setor de transportes no PLAC e no PD de Minas Gerais.....	21
Soluções e barreiras para redução de emissões no setor de transporte .....	23
Eletrificação .....	23
Biocombustíveis.....	24
Hidrogênio de baixo carbono .....	26
Aumento da eficiência energética e racionalização da matriz modal.....	28
CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS .....	30
DESTAQUES E PRÓXIMOS PASSOS .....	34
Próximos passos .....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36



## Índice de figuras

Figura 1: Representatividade das emissões por setor - BR e MG .....	9
Figura 2: Fontes de emissão e composição dos setores avaliados no projeto Rota.....	15
Figura 3: Emissões do setor de transporte mundiais e brasileiras.....	16
Figura 4: Representatividade dos modais nas emissões do setor de transporte .....	17
Figura 5: Critérios de classificação das tecnologias de descarbonização .....	31
Figura 6: Resultado da avaliação das tecnologias .....	33

## Índice de tabelas

Tabela 1: Dinâmica das emissões e preços de etanol e gasolina.....	18
Tabela 2: Ações propostas pelo PLAC-MG e PD-MG para a descarbonização do setor de transporte até 2050.....	21
Tabela 3: Notas atribuídas às tecnologias avaliadas .....	32



# ACRÔNIMOS

AFOLU – Agropecuária, Floresta e Outros Usos da Terra

BEVs – Veículos Elétricos a Bateria

Bio-GNL – Biometano liquefeito

BioQAV – Bioquerosene de Aviação

CH<sub>4</sub> – Gás Metano

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

COP 21 – 21ª Conferência das Partes

ESG – Ambiental, Social e Governança

FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais

FJP – Fundação João Pinheiro

GEE – Gás de Efeito Estufa

GNL – Gás Natural Liquefeito

GNV – Gás Natural Veicular

HEVs – Veículos Elétricos Híbridos

HFC – Hidrofluorcarbonetos

ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade

IEF – Instituto Estadual de Florestas

IEF – Instituto Estadual de Florestas

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

IMVC – Índice Mineiro de Vulnerabilidade Climática

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima



N<sub>2</sub>O – Óxido Nitroso

NDCs – Contribuições Nacionalmente Determinadas

NO<sub>x</sub> – Óxidos de Nitrogênio

PDMG – Plano de Descarbonização para o Estado de Minas Gerais

PEMC-MG – Política Estadual sobre Mudanças Climáticas

PHBC – Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono

PHEVs – Veículos Elétricos Plug-In

PIB – Produto Interno Bruto

PLAC-MG – Plano de Ação Climática de Minas Gerais

PNMC – Política Nacional sobre Mudança do Clima

Rehidro – Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono

REXs – Extensores de Alcance

RGIs – Regiões Geográficas Imediatas

SAF – Combustível Sustentável de Aviação

Sedese – Secretaria de Estado de Desenvolvimento Social

SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

SF<sub>6</sub> – Hexafluoreto de Enxofre

SSBH – Aeroporto de Belo Horizonte/Pampulha - Carlos Drummond de Andrade

TKU – Tonelada Quilômetro Útil

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



# INTRODUÇÃO

Este documento tem como objetivo apresentar um diagnóstico inicial para o setor de transporte no estado de Minas Gerais, compondo o *roadmap* setorial em desenvolvimento no âmbito do programa Rota da Descarbonização<sup>1</sup>

Para atingir esse propósito, o documento está organizado em quatro seções:

- **Seção 1:** aborda os impactos das mudanças climáticas no Brasil, destacando a conexão entre compromissos climáticos nacionais e políticas subnacionais. Inclui uma comparação dos perfis de emissões do Brasil e de Minas Gerais e um panorama das iniciativas de Minas Gerais na agenda climática;
- **Seção 2:** apresenta a definição adotada pelo projeto Rota para classificar as emissões de seus setores-chave, seguida do diagnóstico do setor de transporte sob a perspectiva da descarbonização e o perfil deste setor no estado de Minas Gerais. Na sequência, traz um benchmarking de tecnologias adotadas em planos de descarbonização de outros estados brasileiros e a identificação de soluções e barreiras para a redução de emissões associadas ao setor de transporte;
- **Seção 3:** classificação de tecnologias existentes para a descarbonização do setor de transporte considerando potencial de redução de emissões e critérios ligados à implementação dessas tecnologias no estado de Minas Gerais;
- **Seção 4:** resume os principais pontos discutidos nas seções anteriores e apresenta os próximos passos do projeto na sequência do diagnóstico setorial.

---

<sup>1</sup> O “Rota da Descarbonização” é um programa do Governo do Estado de Minas Gerais, com apoio da Invest Minas, da Codemge (Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais) e de várias secretarias estaduais. A descrição detalhada do programa é feita na seção de contextualização.



# CONTEXTUALIZAÇÃO

## Desafios e oportunidades da agenda climática no Brasil e em Minas Gerais

As mudanças climáticas e suas consequências são alguns dos principais desafios a serem enfrentados no século XXI. Estima-se que as atividades humanas tenham causado um aquecimento da temperatura terrestre de 1,1°C entre 2011 e 2021, em relação ao período pré-industrial (1850-1900) (IPCC, 2023). Estudos indicam que é provável que este aumento atinja 1,5°C entre 2030 e 2052, caso as metas de redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) não se concretizem (IPCC, 2023).

Nesse contexto, em 2015, na 21ª Conferência das Partes (COP 21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), 195 países assinaram o Acordo de Paris, comprometendo-se a limitar o aquecimento global a 2°C, com esforços para 1,5°C (MMA, s.d.). Para isso, submeteram suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), que são metas de redução de emissões de GEE ajustadas aos contextos sociais e econômicos de cada país. O Brasil ratificou sua NDC em 2016, comprometendo-se a reduzir suas emissões de GEE em 37% até 2025, em relação aos níveis de 2005 (MMA, s.d.). Oito anos depois, em 2024, o Brasil revisou suas metas e, atualmente, o compromisso é de redução de 59 a 67% das emissões até 2035, em relação a 2005 (BRASIL, 2024a).

O estabelecimento de metas pelo Brasil tem um papel importante na redução das emissões globais, visto que, em 2019, o país ocupava a 6ª posição entre os mais emissores do mundo (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2024). Naquele ano, o Brasil gerou 2,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e, representando um aumento de 15% em relação a 2018 (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024). Em 2019, as emissões associadas a Uso da Terra, Mudanças no Uso da Terra e Floresta (LULUCF, na sigla em inglês), incluindo o desmatamento em todos os biomas, representaram 51% do total de emissões. O setor agropecuário contribuiu com 24%, seguido pelo setor de energia com 17%. Em menor escala, os setores de Resíduos e de Processos Industriais e Uso de Produtos (IPPU, na sigla em inglês) respondem por cerca de 4% cada (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024).

Para aumentar a ambição climática e a efetividade dos compromissos assumidos a nível nacional, é preciso envolver os governos subnacionais (cidades e estados) na redução de emissões, no fortalecimento da resiliência territorial e na ampliação dos esforços nacionais para avançar na agenda climática e ambiental. Em 2023, a COP 28 mostrou a importância dos líderes locais na ação climática, reunindo mais de 500 governos locais na Cúpula inaugural da Ação Climática Local (LCAS), na qual foi lançada a Coligação para Parcerias Multinível de Alta Ambição para a Ação Climática (CHAMP, na sua sigla em inglês). Endossada por 72 países, entre eles o Brasil, a CHAMP visa fortalecer a cooperação entre governos nacionais e subnacionais no planejamento e execução de estratégias climáticas, integrando ações locais nas NDCs para promover maiores reduções de emissões e aumentar a

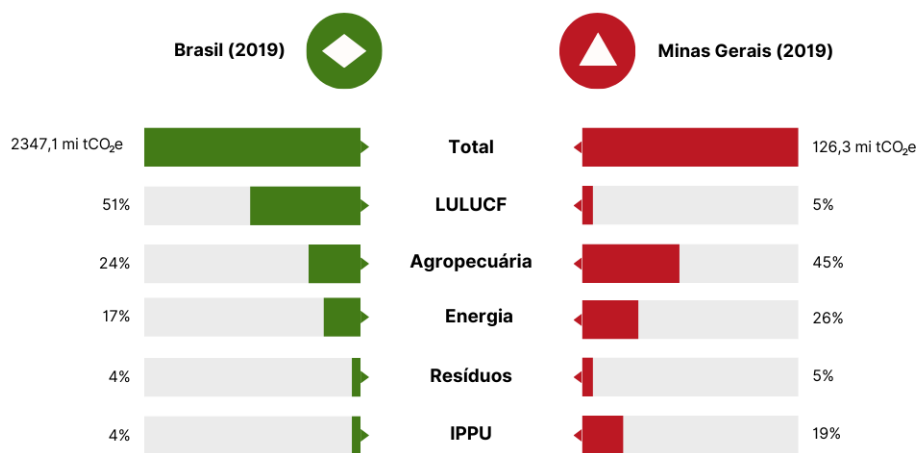


resiliência climática. Em 2025, o Brasil será o anfitrião da COP 30, o que oferece ao país a oportunidade de se posicionar como liderança climática no cenário internacional, apresentando compromissos e ações ambiciosas. Esse movimento envolve a revisão das políticas nacionais visando o atingimento das metas estabelecidas na nova NDC, bem como o fortalecimento da participação dos governos locais nessa agenda. Para isso, é fundamental observar as particularidades de cada estado na definição de políticas e ações para o atingimento das metas climáticas nacionais.

Nessa linha, vale destacar o perfil de emissões do estado de Minas Gerais e do Brasil, a fim de compreender como essa dinâmica pode informar a estratégia de descarbonização do estado e quais são os pontos de encontro com o contexto nacional. Minas Gerais possui um perfil de emissões concentradas em setores distintos daqueles associados às emissões do país, exigindo uma estratégia diferente da nacional para a descarbonização do estado.

Em 2019, o estado de Minas Gerais representou cerca de 5% das emissões brasileiras, emitindo 126,3 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e, com o setor de agropecuária responsável por 45% dessas emissões. Os setores de energia, processos industriais e uso de produtos, uso da terra e resíduos apresentaram participações de 26%, 19%, 5% e 5% respectivamente (MINAS GERAIS, 2022), conforme ilustrado da Figura 1.

Figura 1: Representatividade das emissões por setor - BR e MG



Fonte: Elaboração própria com base em Minas Gerais (2022) e Observatório do Clima (2024)

A maior diferença entre o perfil de emissões nacional e o de Minas Gerais está na representatividade do setor AFOLU (LULUCF + agropecuária). Enquanto o desmatamento segue como a principal alavanca de emissões no território nacional em LULUCF, Minas Gerais já possui um montante significativo de áreas consolidadas, ou seja, áreas que passaram por um processo de remoção da vegetação nativa no passado e atualmente são destinadas a algum tipo de atividade econômica. Ainda, vale destacar que o estado é o 5º do Brasil em



área de vegetação nativa (MAPBIOMAS, 2024), atrás apenas de 3 estados da Amazônia legal, onde as regras do código florestal são mais exigentes em termos de percentual de reserva legal (BRASIL, 2012), e da Bahia. Além disso, o estado de Minas Gerais vem reduzindo anualmente o desmatamento por meio do fortalecimento da fiscalização ambiental e do monitoramento contínuo da vegetação, o que explica uma participação reduzida do setor LULUCF em suas emissões, se comparado ao Brasil (MINAS GERAIS, 2022). O protagonismo das emissões de Minas Gerais é observado na atividade pecuária, principalmente na bovinocultura, cujo rebanho é o terceiro maior do país e mantenedor da maior produção leiteira nacional (MINAS GERAIS, 2022).

Além do setor agropecuário, os setores de IPPU e energia também possuem uma participação mais elevada em Minas Gerais do que no Brasil, o que vai ao encontro da representatividade desses setores na economia do estado. Minas Gerais possui uma forte atividade industrial, especialmente em relação à produção de metais, que influenciam nas emissões de IPPU, sendo responsável por 40% do valor da produção mineral comercializada no Brasil em 2019 (MCTI, 2020).

Já com relação ao setor de energia, que contempla os subsetores de combustão móvel e estacionária<sup>2</sup>, Minas Gerais foi o segundo estado brasileiro com maior volume de licenciamento de veículos em 2019, representando 21% do total de registros no país (ANFAVEA, 2020). As emissões relacionadas ao uso dos veículos automotores, bem como as emissões associadas à combustão estacionária (queima de combustíveis) nas indústrias, contribuem para a maior participação do setor nas emissões do estado, quando comparado ao país como um todo.

Essa dinâmica particular do estado é importante sob duas perspectivas complementares: por um lado, ressalta a necessidade de integrar políticas climáticas nacionais às realidades econômicas locais, garantindo que as estratégias adotadas acomodem especificidades subnacionais para que alcancem os resultados esperados; e, de outro, reforça a importância da construção de estratégias locais baseadas em uma investigação robusta da realidade local e dos desafios de implementação por ela colocados, promovendo assim uma ação climática efetiva e equilibrada a nível subnacional, capaz também de contribuir com a descarbonização do país.

---

<sup>2</sup> As classificações utilizadas nos setores do Rota se diferenciam das classificações utilizadas no Inventário de Minas Gerais. Nesse caso, o setor de transporte representa as emissões de combustão móvel. As diferenças entre as classificações setoriais no Inventário de Minas Gerais e no Rota são apresentadas no capítulo “DIAGNÓSTICO SETORIAL – TRANSPORTE”.



# Enfrentamento dos desafios climáticos em Minas Gerais

Desde 2005, Minas Gerais vem realizando diversas ações de combate às mudanças climáticas, que contribuem não apenas para a redução das emissões no estado, mas servem de modelo para o restante do país. A lista abaixo apresenta um resumo das principais ações realizadas pelo estado no combate às mudanças climáticas.

## **2005 Criação do Fórum Mineiro de Mudanças Climáticas**

O Fórum Mineiro de Mudanças Climáticas foi criado como um espaço de diálogo entre diversos atores, incluindo o governo, a sociedade civil e o setor privado. Seu objetivo principal foi promover a discussão no estado sobre o fenômeno das mudanças climáticas e subsidiar a formulação de políticas de mitigação e adaptação. Esta iniciativa marcou o início da estruturação formal das políticas climáticas no estado.

## **2006 Projeto-piloto de Compras Públicas Sustentáveis no Brasil**

Este projeto-piloto foi fundamental para fomentar as compras públicas sustentáveis no Brasil, com Minas Gerais participando ativamente. A adoção de práticas de compras sustentáveis reduz o impacto ambiental das compras públicas e sua cadeia de fornecimento, incentivando o uso de tecnologias e produtos com menor emissão de carbono.

## **2007 Associação à Rede ICLEI**

A adesão de Minas Gerais à rede Governos Locais pela Sustentabilidade (ICLEI) demonstra o compromisso em alinhar-se com práticas internacionais de sustentabilidade. O ICLEI é uma organização global que apoia governos locais no desenvolvimento de políticas e ações de sustentabilidade, com foco em adaptação e mitigação climática.

## **2008 1º Inventário de GEE do Estado de Minas Gerais**

Este primeiro inventário abrange as emissões de 2005 e representou um passo crucial na mensuração das emissões de GEE em Minas Gerais. O levantamento de dados precisos foi fundamental para a formulação de políticas eficazes de mitigação e adaptação, além de orientar as metas de descarbonização.

## **2013 2º Inventário de GEE do Estado de Minas Gerais**

Com a contabilização das emissões de 2010, o segundo inventário de GEE consolidou a prática de monitoramento contínuo das emissões no estado. Ele serviu como uma atualização importante para avaliar o progresso na redução de emissões e ajustar estratégias políticas.



**2014 Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais**

O Plano de Energia e Mudanças Climáticas de 2014 trouxe um foco especial para os arranjos institucionais e de governança no estado, estabelecendo diretrizes claras para mitigar os impactos das mudanças climáticas no setor energético.

**2014 Estudo de Vulnerabilidade Regional às Mudanças Climáticas de Minas Gerais**

Este estudo foi um dos primeiros a mapear vulnerabilidades específicas do estado às mudanças climáticas, identificando áreas e setores mais suscetíveis. O estudo possibilitou a elaboração e priorização de políticas de adaptação, essenciais para mitigar riscos climáticos como secas, enchentes e ondas de calor.

**2016 3º Inventário de emissões de GEE**

O terceiro inventário de GEE consolidou dados de múltiplos anos (ano-base 2005-2014), permitindo uma análise de longo prazo das emissões do estado. Este levantamento foi essencial para avaliar o impacto das políticas implementadas e ajustar estratégias visando a redução de emissões.

**2021 Criação do Fórum Mineiro de Energia e Mudanças Climáticas**

Este fórum trouxe um enfoque renovado na discussão de políticas climáticas, especificamente sobre o setor energético.

**2021 Adesão ao *Race to Zero***

A adesão ao *Race to Zero*, em 2021, marca o compromisso de Minas Gerais em alcançar a neutralidade de carbono até 2050, sendo o primeiro estado brasileiro a aderir à iniciativa. Esta iniciativa global envolve governos e empresas comprometidos com a implementação de ações robustas de descarbonização.

**2022 4º Inventário de GEE do Estado de Minas Gerais**

A quarta edição do Inventário de Emissões e Remoções de GEE de Minas Gerais abrange as emissões de 2019. Priorizando transparência e participação, o inventário foi elaborado com a colaboração de entidades públicas, setor privado e instituições de pesquisa, garantindo maior precisão nos dados sobre emissões e remoções no estado.

**2022 Plano de descarbonização para o estado de Minas Gerais dentro de um Brasil clima neutro em 2050**

O Plano de Descarbonização (PD) propôs um conjunto de ações voltadas à meta de que o estado alcance a neutralidade climática de suas atividades econômicas a um mínimo custo possível até 2050. Os estudos que subsidiaram a construção do plano incluem a modelagem dos cenários de referência e de descarbonização.



### 2023 **Cartilha para elaboração de Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica**

Desenvolvida pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF), a cartilha pretende orientar os municípios mineiros para a elaboração de seus Planos de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica, exigidos pela Lei Federal 11.428/06 (Lei da Mata Atlântica), além de disponibilizar capacitações e modelos de documento.

### 2023 **Plano Estadual de Ação Climática (PLAC-MG)**

O Plano Estadual de Ação Climática de Minas Gerais tem por objetivo auxiliar na gestão climática do estado, trazendo ações de mitigação das emissões de gases de efeito estufa e enfrentamento à mudança do clima, acelerando o desenvolvimento urbano de baixo carbono por meio de novas tecnologias e inovações.

### 2023 **Rota da Descarbonização**

O programa Rota da Descarbonização é uma iniciativa do Governo de Minas Gerais, com apoio da Invest Minas, que visa promover investimentos privados na economia de baixo carbono. Com esse objetivo, e mobilizando atores-chave nos setores público e privado, o programa desenvolverá uma rota estratégica (*roadmap*) para a descarbonização dos setores mais relevantes em termos de emissões de GEEs, contribuindo assim para o alcance das metas estabelecidas no PLAC-MG e para a realização do compromisso de Minas Gerais com a campanha *Race to Zero*.

### 2024 **Instituição do Comitê Intragovernamental de Energia e Mudanças Climáticas (CIMC)**

Publicação do Decreto nº 48.896, de 18/09/2024, que institui o Comitê Intragovernamental de Energia e Mudanças Climáticas, com o objetivo de subsidiar a formulação e monitorar a execução de ações e políticas públicas relacionadas à mudança do clima e às energias renováveis no âmbito do Poder Executivo.

### 2024 **Monitoramento do PLAC: MRV Climático**

A ferramenta de Monitoramento, Reporte e Verificação (MRV Climático) foi lançada durante a participação do Governo de Minas na 29ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP29), em Baku, no Azerbaijão. A ferramenta será fundamental para mensurar o avanço sistemático da execução do Plano Estadual de Ação Climática (PLAC).

### 2021-2024 **Participação em Eventos Internacionais**

Desde 2021, Minas Gerais tem participado ativamente das conferências climáticas da ONU e de outros eventos importantes para a agenda climática, como a Assembleia Geral da ONU – Cúpula da Ambição Climática, em Nova York. Essa participação não apenas reforça o compromisso do estado com as negociações climáticas globais, mas também destaca a importância do diálogo internacional na formulação de políticas climáticas eficazes em níveis local e regional.



Considerando a relevância das mudanças climáticas para as condições sociais, econômicas e ambientais do estado, destaca-se que Minas Gerais aderiu, em 2021, à campanha *Race to Zero*, agenda global de compromisso e estabelecimento de metas para alcançar a neutralização das emissões de carbono até 2050, sendo o primeiro estado brasileiro a aderir à iniciativa. Desde então, Minas Gerais tem se destacado na realização de estudos e na implementação de políticas e ações voltadas para o enfrentamento das mudanças climáticas, passos necessários para o avanço do estado nas fases na campanha, a exemplo do lançamento da ferramenta de MRV Climático na COP 29, em novembro de 2024.

Na esteira dessas iniciativas, e tomando como fundamento o Plano Estadual de Descarbonização (PD) e o Plano Estadual de Ação Climática de Minas Gerais (PLAC-MG), foi idealizado o programa Rota da Descarbonização. Com o apoio técnico da WayCarbon, o desenvolvimento do Rota busca definir um *roadmap*, ou roteiro estratégico, a ser seguido para que os investimentos privados necessários para descarbonizar a economia mineira possam ser identificados e viabilizados. O *roadmap* se desdobra em quatro macro setores – transporte, energia, indústria e AFOLU (agropecuária, florestas e uso do solo) – e suas etapas incluem a elaboração de diagnósticos setoriais e de cenários de descarbonização, o mapeamento e priorização das principais soluções tecnológicas, a identificação de necessidades e oportunidades de investimento e a construção de propostas de implementação ou revisão de políticas públicas.

O diagnóstico setorial do transporte, primeira etapa do *roadmap* para esse setor, será detalhado na próxima seção deste documento.

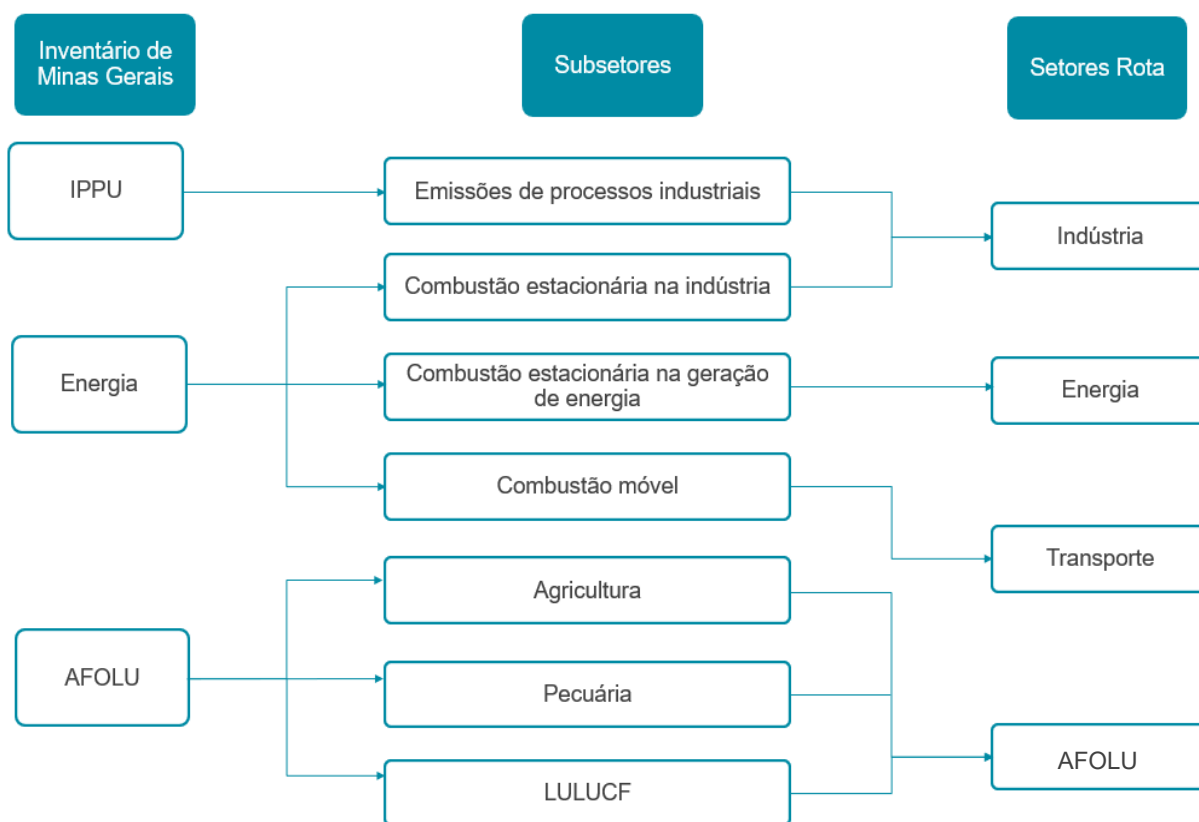
A evolução nas políticas climáticas do estado e os avanços nas ações de implementação, a exemplo do Rota e da ferramenta de MRV Climático, evidenciam o potencial de Minas Gerais de se consolidar como referência na agenda climática, algo particularmente relevante no contexto da COP 30, a ser realizada no Brasil, e para a competitividade de Minas Gerais em relação a outros estados brasileiros na atração de investimentos e geração de empregos verdes e de qualidade.



# DIAGNÓSTICO SETORIAL – TRANSPORTE

No âmbito do *roadmap* do Rota, a avaliação das fontes de emissão associadas ao setor de transporte no estado de Minas Gerais teve como base a classificação por setores econômicos. De forma geral, o setor de transporte irá endereçar as emissões de combustão móvel. Para os demais, a classificação adotada é: (i) setor de indústria inclui as fontes de emissão relacionadas aos processos industriais não provenientes de combustão (Setor IPPU) e emissões de combustão estacionária da indústria; (ii) setor de energia endereça as emissões relacionadas à geração de energia elétrica, à produção de combustíveis e biocombustíveis e ao refino de petróleo; e (iii) setor de AFOLU abarca as emissões relacionadas à LULUCF, agricultura e pecuária. A Figura 2 apresenta essa divisão.

Figura 2: Fontes de emissão e composição dos setores avaliados no projeto Rota



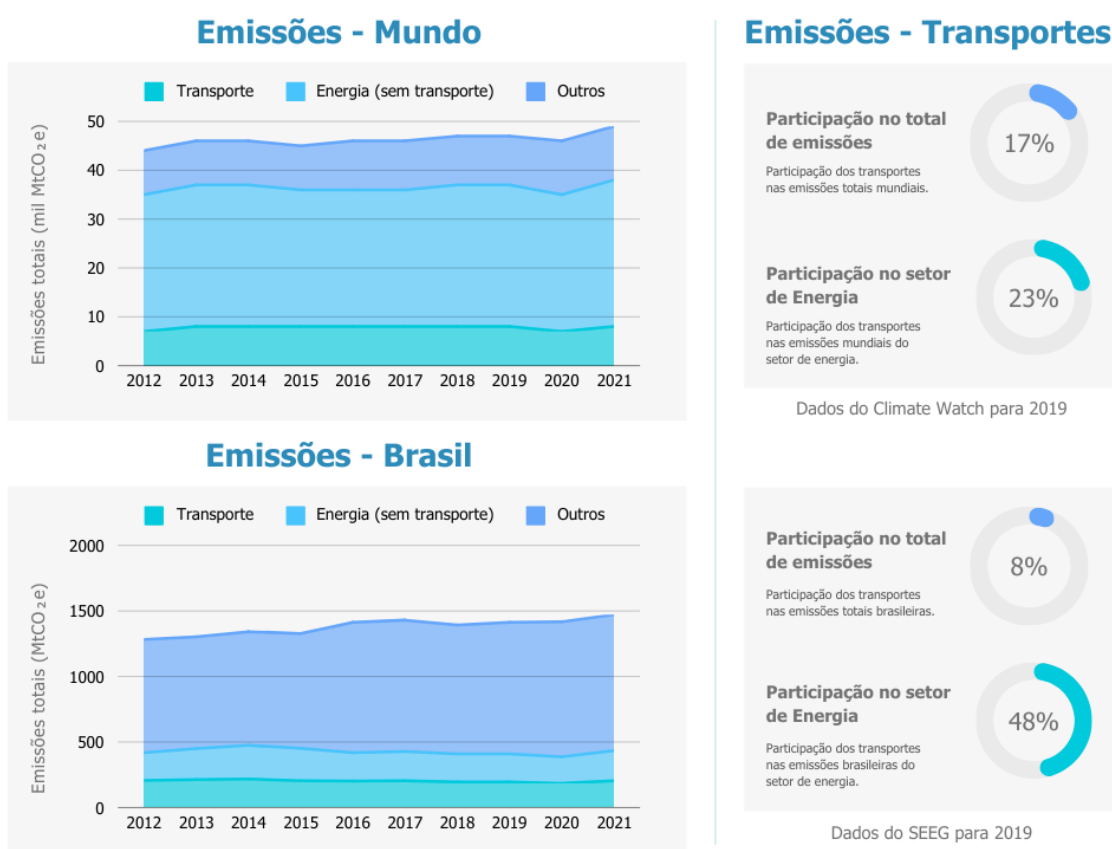
Fonte: Elaboração própria



## Contextualização sobre as emissões do setor em Minas Gerais

No mundo, as emissões de GEE associadas ao transporte representaram 17% das emissões totais e 23% das emissões associadas ao setor de energia em 2019 (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2024). Nesse mesmo ano, o transporte brasileiro foi o sexto maior emissor do mundo (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2024), totalizando 196,5 MtCO<sub>2</sub>e, o que representou 8% das emissões totais do país e 48% das emissões do setor de energia brasileiro (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024). Ainda assim, nota-se que, entre 2014 e 2021, houve uma redução de 6,6% nas emissões absolutas do transporte brasileiro, que passaram de 218,4 MtCO<sub>2</sub>e para 204,0 MtCO<sub>2</sub>e (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024), como mostrado na Figura 3. Esta redução ocorreu em um período de desaceleração da economia, agravado pela pandemia de COVID-19.

Figura 3: Emissões do setor de transporte mundiais e brasileiras



Fonte: Elaboração própria com base em World Resources Institute (2024) e Observatório do Clima (2024)

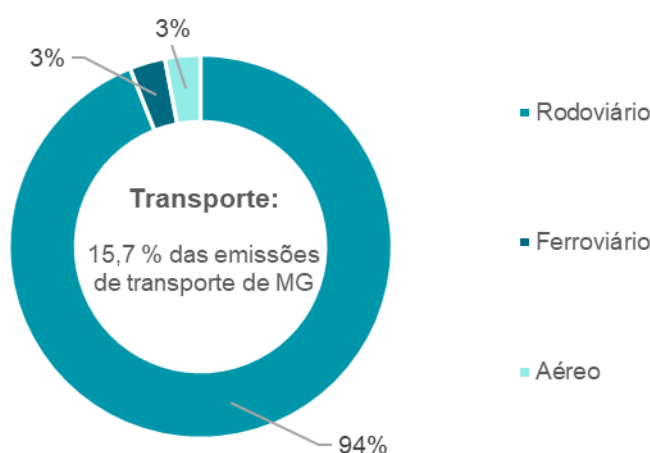
Em Minas Gerais, o setor de transportes desempenhou um papel significativo nas emissões do estado, representando 15,7% das emissões totais e 61,3% das emissões do setor de



energia mineiro em 2019 (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 e o desafio enfrentados 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 de transportes 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 (ou gasolina C), com 28,4% (MINAS GERAIS, 2022).

Figura 4: Representatividade dos modais nas emissões do setor de transporte



Fonte:

Elaboração própria com base em MINAS GERAIS (2022)

Em 2019, Minas Gerais possuía uma frota de 11,7 milhões de veículos, colocando o estado no posto de 2ª maior do país. A frota foi composta, principalmente, por veículos leves: automóveis e motocicletas, representando 55% e 25% do total, respectivamente. Caminhões, caminhonetes e reboques tiveram uma representatividade de 18%, enquanto ônibus e utilitários tiveram participações próximas de 1% cada. Entre 2013 e 2023, a frota veicular de Minas Gerais cresceu 51,7%, impulsionada pela urbanização e pelo crescimento populacional, pressionando a demanda por combustíveis fósseis no estado (IBGE, 2023). Em 2017<sup>3</sup>, o modal rodoviário foi responsável por concentrar 85,5% dos passageiros

<sup>3</sup> O Plano Estratégico Ferroviário de Minas Gerais apresenta dados de TKU por modal apenas para o ano 2017.



transportados no estado, enquanto o transporte rodoviário de cargas representou 53,4% do TKU (tonelada quilômetro útil) movimentado (MINAS GERAIS, s.d.).

Durante o período de 2015 a 2019, observou-se uma redução geral de 12,3% nas emissões do setor de transporte, com um decréscimo de 11,5% no modal rodoviário. Este movimento ocorreu, principalmente, devido à redução das emissões associadas à gasolina C, cuja participação passou de 32,9%, em 2015, para 28,4%, em 2019, ao passo que o etanol hidratado teve um crescimento de 80% no mesmo período. Como, nesse mesmo período, a maior parte das vendas de veículos leves correspondeu a modelos *flex fuel*, é possível inferir que o preço seja um dos principais fatores que influenciam a escolha do combustível utilizado.

Neste período, a relação entre os preços do etanol e da gasolina em Minas Geras variou seguindo a mesma tendência observada nas emissões, ou seja, quando houve um aumento proporcional do preço do etanol em relação à gasolina, houve também um aumento das emissões da gasolina e uma redução das emissões de etanol. O contrário também ocorreu com a redução do preço do etanol em relação à gasolina, levando a uma redução das emissões desse combustível fóssil. A Tabela 1 demonstra esse comportamento. Observa-se que, por ser um combustível renovável, a substituição da gasolina por etanol gera uma redução absoluta das emissões no transporte rodoviário.

Tabela 1: Dinâmica das emissões e preços de etanol e gasolina

	2015	2016	2017	2018	2019
Emissões Etanol (MtCO <sub>2</sub> e)	82.794	67.386	68.377	115.856	148.616
Emissões Gasolina (MtCO <sub>2</sub> e)	7.337.446	7.703.373	7.801.476	6.098.723	5.634.338
Variação preço (etanol/gasolina)	64,9%	71,4%	68,6%	62,7%	62,1%

Fonte: Elaboração própria com base em ANP (2024a) e MINAS GERAIS (2022)

Embora a redução de emissões associadas ao setor de transporte em Minas Gerais nos últimos anos seja evidente, ainda há um caminho a ser percorrido para a sua descarbonização. Por exemplo, os dados mostram que a redução nas emissões de diesel foi pouco expressiva, atingindo 5% no período 2015-2019, podendo ser justificada pela adição obrigatória do biodiesel no diesel, que passou de 7%, em 2015, para 11%, em 2019 (ANP, 2022a).

No que diz respeito ao transporte ferroviário de passageiros, a participação do modal na matriz de transporte mineira foi de 0,7% do total de passageiros transportados, em 2017 (MINAS GERAIS, s.d.). Já sobre o modal ferroviário no estado, Minas Gerais possui a maior rede ferroviária para o transporte de cargas no Brasil, com uma extensão de 4.909 km lineares, compondo 16% da extensão total de ferrovias brasileiras e transportando cerca de metade do



volume de carga movimentado por esse modal no país (MINAS GERAIS, 2022). Apesar da grande extensão e de transportar cerca de 43% do volume total de cargas do estado (MINAS GERAIS, s.d), as emissões associadas ao transporte ferroviário são relativamente baixas, contribuindo com apenas 3% das emissões totais de fontes móveis do estado (MINAS GERAIS, 2022).

Em relação ao modal aéreo, este foi responsável por cerca de 3% das emissões em 2019, apresentando uma tendência de queda nas emissões totais desde 2015, o que resultou em uma redução de 10,6% nas emissões desse modal desde o início da série (MINAS GERAIS, 2022). O Aeroporto Internacional de Confins e o Aeroporto Carlos Drummond de Andrade (SSBH), conhecido como Aeroporto da Pampulha, são os principais polos da aviação no estado. Com um total de 49.322 pousos e decolagens, o Aeroporto de Confins foi o 10º aeroporto mais movimentado no Brasil em 2019, ano em que seu fluxo de aviões se reduziu 10,8% em relação à 2015 (BRASIL, 2019). O Aeroporto da Pampulha foi o 16º em número de pousos e decolagens do país em 2019, totalizando 34.711, com uma redução de 19,4% em relação a 2015 (BRASIL, 2019).

A redução das emissões ocorreu em um período de redução da movimentação nos aeroportos, porém, desde 2021, existe uma tendência de aumento dos pousos e decolagens nestes aeroportos, o que pode levar ao aumento das emissões associadas ao modal aéreo no estado (BRASIL, 2021; BRASIL, 2023). Sendo assim, buscar alternativas para este modal também é importante para a construção de uma estratégia de descarbonização do setor de transporte em Minas Gerais.

## Benchmarking das tecnologias previstas nos planos estaduais de descarbonização

O setor de transporte desempenha um papel crucial no perfil de emissões de Minas Gerais, refletindo a dinâmica econômica e as escolhas de mobilidade da população, sendo crescentes as estratégias de descarbonização para todos os modais. Dessa forma, este diagnóstico buscou avaliar as melhores práticas previstas em planos de descarbonização estaduais, incluindo o de Minas Gerais, além de outras tecnologias de benchmarking que possam fazer sentido para o contexto atual do estado.

Os estados brasileiros que possuem plano de descarbonização são: Pernambuco (PE), Espírito Santo (ES), São Paulo (SP), além do próprio estado de Minas Gerais (MG). Todos eles foram incluídos na análise, especialmente devido ao fato de que os perfis de emissões do setor de transporte em outros estados também demonstram uma predominância das emissões no modal rodoviário, auxiliando na identificação de tecnologias que possam contribuir para a construção dos cenários de descarbonização do *roadmap* deste setor para



Minas Gerais. De forma geral, todos os planos classificam as alternativas de descarbonização em três principais eixos: uso de combustíveis renováveis, eletrificação e aumento da eficiência energética do setor.

Em relação ao primeiro eixo, os planos de descarbonização destacam o uso de biodiesel, biometano e o HVO (também conhecido como diesel verde) como uma tendência para a descarbonização dos estados. O plano do Espírito Santo propõe o uso de etanol para veículos leves e de biodiesel, hidrogênio, HVO e biometano para veículos pesados de carga e transporte coletivo de passageiros. No caso do transporte coletivo, ainda há uma indefinição quanto à adoção da rota de biocombustíveis ou da eletrificação para o caso do Espírito Santo.

De fato, o plano de descarbonização daquele estado indica um maior potencial de mitigação com o uso de biocombustíveis para veículos pesados, enquanto o foco dos veículos leves seria a eletrificação, ainda que com veículos híbridos. Segundo descrito no documento, a opção por combustíveis como biodiesel, HVO e hidrogênio considera as projeções nacionais para o aumento da disponibilidade desses combustíveis.

Em Pernambuco, o plano de descarbonização também indica uma tendência de uso de biocombustíveis para o transporte pesado, incluindo metas para o uso de HVO no transporte rodoviário, bioquerosene no transporte aéreo e biodiesel nas embarcações. Para a garantia do atingimento das metas, o plano de Pernambuco aponta a necessidade de incentivo para projetos pilotos que desenvolvam essas tecnologias.

Em relação à eletrificação, além do plano de Minas Gerais e do Espírito Santo, os estados de São Paulo e Pernambuco também incluem esta medida em suas estratégias. O Espírito Santo é relativamente conservador, estabelecendo uma meta de 15% de veículos leves 100% elétricos e 85% de veículos leves híbridos *flex* ou híbridos *plug-in flex* até 2050. A meta de São Paulo também indica a adoção de veículos leves eletrificados, chegando a 100% até 2040, ainda que não faça distinção entre 100% elétricos ou híbridos. Pernambuco, por sua vez, indica que a eletrificação da frota leve é uma medida com alto potencial de redução e custo médio, podendo contribuir para o crescimento econômico, caso o estado promova incentivos fiscais para a atração de montadoras.

As metas do estado de Pernambuco indicam um direcionamento para a eletrificação da frota a médio e longo prazo, devendo chegar à 100% dos veículos leves até 2050. O estado destaca que essa medida só contribuirá, de fato, para a descarbonização caso seja acompanhada da geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis, sendo necessário ainda garantir a infraestrutura de recarga para a eletromobilidade.

O terceiro pilar dos planos de descarbonização do setor de transporte se relaciona ao aumento da eficiência do transporte e está ligado à otimização dos processos logísticos, à racionalização da matriz modal e a um direcionamento para o transporte coletivo de



passageiros. Como exemplo, é possível citar a estratégia do Espírito Santo, que dá destaque à substituição do transporte de passageiro individual pelo coletivo como uma medida com potencial importante para a redução das emissões, sem deixar de reforçar que sua efetividade está associada à realização de investimentos necessários para melhorar a atratividade do transporte público. Por sua vez, Pernambuco inclui não apenas o aumento do transporte público como parte importante de sua estratégia, mas também um incentivo ao transporte ativo e à micromobilidade compartilhada.

No que diz respeito ao transporte de carga, o plano do estado de Pernambuco possui ações relacionadas ao incentivo à manutenção dos veículos, condução eficiente e manutenção das estradas. Já no plano do estado de São Paulo, o aumento da eficiência energética foca no transporte de passageiro, ao incentivar o uso de modais de transporte mais eficientes, como ônibus rápido, trens leves e metrô em substituição ao modal rodoviário. Além disso, o plano do estado de São Paulo também indica um planejamento urbano inteligente, que garanta viagens mais curtas e não motorizadas.

## O setor de transportes no PLAC e no PD de Minas Gerais

É possível observar que Minas Gerais tem implementado diversas iniciativas focadas na descarbonização do setor de transporte como parte da estratégia do estado para neutralizar suas emissões até 2050 e que há um certo grau de convergência com ações identificadas também em outros estados. Os principais norteadores da estratégia de descarbonização de Minas Gerais são o seu Plano de Ação Climática (PLAC-MG), de 2023, e o Plano de Descarbonização (PD) para o Estado de Minas Gerais dentro de um Brasil clima neutro em 2050 (PD-MG), de 2022.

Construído tendo como linhas de atuação a mitigação e a adaptação, aliadas à inovação e aos princípios de justiça climática, o PLAC-MG apresenta 28 ações prioritárias para o estado, divididas em 12 setores estratégicos. Para o setor de transporte, são elencadas duas ações principais, divididas em sete subações. Essas ações foram definidas a partir dos resultados obtidos no PD-MG, que avaliou cinco soluções de descarbonização para o transporte de Minas Gerais. As ações e medidas propostas pelo PLAC-MG e pelo PD-MG estão detalhadas na Tabela 2.

*Tabela 2: Ações propostas pelo PLAC-MG e PD-MG para a descarbonização do setor de transporte até 2050*

**Plano Estadual de Ação Climática de Minas Gerais (PLAC-MG)**

**Ação 1:** Promover a mudança modal de carga e passageiros, a mobilidade urbana

**Subação 1:** Promover a mobilidade urbana sustentável, o aumento das ciclovias e de facilidades para micromobilidade, além da eficiência energética na logística de cargas na região metropolitana de Belo Horizonte.



	sustentável e o planejamento integrado do uso do solo para o setor de transportes.	<b>Subação 2:</b> Promover a mobilidade urbana sustentável, o aumento das ciclovias e de facilidades para micromobilidade na região metropolitana do Vale do Aço.
		<b>Subação 3:</b> Requalificar e reativar linhas férreas e aumentar a quantidade de passageiros e cargas transportadas.
		<b>Subação 4:</b> Incentivar o uso e integração de modais compartilhados.
	<b>Ação 2:</b> Promover a descarbonização no setor de transporte de carga e passageiros	<b>Subação 1:</b> Promover a redução do uso de combustíveis fósseis no estado por meio de incentivos à utilização de biocombustíveis
		<b>Subação 2:</b> Incentivar o uso e integração de modais compartilhados.
		<b>Subação 3:</b> Implementar e acompanhar as ações previstas no Plano Estratégico de Logística de Transportes de Minas Gerais (PELT-Minas).
<b>Plano de Descarbonização para o Estado de Minas Gerais dentro de um Brasil clima neutro em 2050</b>		<b>Solução 1:</b> Planejamento integrado do uso do solo e do setor de transporte.
		<b>Solução 2:</b> Mudança modal (Expansão do uso do transporte coletivo).
		<b>Solução 3:</b> Eletrificação da frota veicular.
		<b>Solução 4:</b> Uso de gasolina e diesel verde.
		<b>Solução 5:</b> Uso de bioquerosene em aeronaves.

Fonte: Elaboração própria com base em MINAS GERAIS (2023) e COPPE-UFRJ/UFMG/USP (2022)

O PLAC-MG apresenta projeções de emissões líquidas totais para o estado no cenário de referência e no cenário no qual o estado zera suas emissões em relação aos níveis de 2020. As medidas propostas para a descarbonização do setor de transporte projetam uma redução de 62,3% nas emissões líquidas até 2050, em comparação com o ano-base de 2020, incluindo uma redução intermediária de 5,6% no período de 2020 a 2030.

Importante ressaltar que tanto Minas Gerais, quanto os demais estados avaliados, possuem planos de descarbonização que indicam uma redução significativa das emissões a partir da promoção do uso de biocombustíveis e veículos elétricos, incentivos para a modernização da frota de transporte público, bem como de medidas de mobilidade urbana sustentável. Porém, desde que os planos de descarbonização foram lançados pelos estados, novas tecnologias e oportunidades de descarbonização para o setor de transporte foram desenvolvidas e seguem sendo mais bem estudadas.

Dessa forma, a próxima seção traz o mapeamento das soluções para a redução de emissões do setor de transporte que serão avaliadas com maior profundidade nas etapas subsequentes da construção do *roadmap* desse setor dentro do Rota. Por fim, cabe destacar que nem o PLAC-MG, nem o PD-MG identificam fontes de financiamento ou incentivos fiscais que possam ser acionados para destravar oportunidades de investimento associadas à



implementação de tecnologias de descarbonização. Esse tema é abordado pelos estados do Espírito Santo e São Paulo e é um dos pontos centrais do projeto Rota, que buscará identificar em seus *roadmaps* setoriais as necessidades e oportunidades de investimento e as fontes de financiamento disponíveis.

## Soluções e barreiras para redução de emissões no setor de transporte

### Eletrificação

A eletrificação é uma importante tecnologia para a descarbonização do transporte de carga no modal rodoviário, entretanto, a demanda energética de um veículo pesado de carga faz com que seja necessária uma infraestrutura de recarga elétrica robusta, ainda incipiente no Brasil.

Em relação ao transporte de passageiros, a adoção dos veículos elétricos e híbridos é uma medida mais promissora em comparação ao transporte rodoviário de carga. Os veículos leves elétricos podem apresentar benefícios ambientais diversos, conforme os diferentes níveis de eletrificação e as fontes de energia utilizadas. Nesse aspecto, a eletrificação é destaque para o estado, visto que há grande proporção de energia de origem renovável na matriz elétrica de Minas Gerais, o que possibilita uma redução ainda mais expressiva de emissões de GEE a partir da substituição de veículos à combustão interna por veículos elétricos ou híbridos (MCTI, 2021).

Em relação às questões econômicas, de modo geral, os veículos híbridos ou elétricos possuem preços mais elevados quando comparados aos demais veículos à combustão em decorrência das barreiras tecnológicas, regulatórias e fiscais relacionadas, como, por exemplo, a inexistência de um marco legal e de linhas de financiamento específicas, a escassez de padrões tecnológicos e o baixo conteúdo local dos componentes da cadeia produtiva. Os veículos 100% elétricos, adicionalmente, carecem de infraestrutura de apoio para o seu abastecimento (MCTI, 2021; LA ROVERE *et al.*; 2023).

Destaca-se que Minas Gerais possui um grande potencial para a produção de lítio, mineral utilizado na fabricação das baterias dos veículos elétricos. Segundo dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), a produção do mineral no estado teve um aumento de 120% entre 2018 e 2022 (Agência Nacional de Mineração, 2024) e investimentos para expansão da produção vem sendo realizados na região do Vale do Jequitinhonha (AGÊNCIA MINAS, 2024).

Há, ainda, veículos elétricos à pilha combustível, que gera energia a partir do etanol ou do hidrogênio. Entretanto, além de demandarem investimentos elevados, esse tipo de tecnologia necessita de mais pesquisa e desenvolvimento para maturação e aumento da sua



escalabilidade. Espera-se que os veículos elétricos se tornem mais competitivos economicamente a partir de algumas condições, como, por exemplo, o aumento no preço do petróleo e dos combustíveis fósseis, menores custos operacionais frente ao desenvolvimento tecnológico e a diminuição nos custos de produção das baterias, que devem apresentar uma redução de até 40% até 2030, segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2024).

Em relação ao transporte ferroviário, a eletrificação dos trens é uma alternativa para aumentar ainda mais a eficiência energética e o potencial de redução de emissões de GEE do modal ferroviário, contribuindo também para a redução da poluição sonora. A eletrificação total ou parcial de trens é empregada em diversos países, a partir de tecnologias como o trem híbrido *MTU Hybrid PowerPack*, da Rolls-Royce, que funciona com um motor elétrico, um gerador e uma tecnologia responsável por recuperar e armazenar energia durante a frenagem chamada de frenagem regenerativa. O transporte ferroviário híbrido de carga pode levar a uma redução de 25% do consumo de diesel e 70% das emissões de NO<sub>x</sub>, além de outros benefícios como a mitigação de 75% da poluição sonora e de 90% de materiais particulados emitidos (MCTI, 2021).

Porém, a eletrificação do transporte ferroviário de carga enfrenta barreiras tecnológicas, financeiras e regulatórias relacionadas à utilização e ao armazenamento de energia elétrica para uso no modal, além de barreiras inerentes à política de transporte nacional, como a falta de construtores e fornecedores ferroviários locais, falta de infraestrutura da malha de trilhos e a inativação ou subutilização de ferrovias existentes (SILVA; PIZZOLATO, 2022).

## Biocombustíveis

O diesel e a gasolina, juntos, têm uma participação de mais de 95% nas emissões do setor de transporte. Portanto, é importante que tecnologias de descarbonização do setor considerem programas e ações que incentivam o uso de biocombustíveis. Nota-se que, para o transporte privado, o custo do etanol em relação à gasolina é um fator decisivo na escolha do combustível pelo proprietário ou usuário do veículo (conforme custos apresentados na Tabela 1, no início da seção). O aumento da produção e distribuição local pode influenciar na redução dos preços dos biocombustíveis, aumentando assim o potencial para sua adoção em veículos leves. Cabe destacar que, em 2019, Minas Gerais foi o 5º maior produtor de etanol do Brasil, com 33 usinas industriais, concentradas no Triângulo Mineiro (ANP, 2024b). Em 2024, ano com os dados mais recentes, o estado concentrou 35 usinas de etanol (ANP, 2024b).

No contexto nacional, existe também um direcionamento do país para a produção de combustíveis renováveis. Em outubro de 2024, foi sancionada a Lei do Combustível do Futuro, que visa promover a mobilidade sustentável e a transição energética no Brasil. A lei institui programas nacionais para o uso de diesel verde, combustível sustentável para aviação (SAF)



e biometano, além de aumentar a mistura de etanol e biodiesel aos combustíveis fósseis. Ademais, o Governo Federal projeta a realização de investimentos de R\$ 260 bilhões com o objetivo de aliar o desenvolvimento econômico à geração de empregos e à sustentabilidade ambiental a partir do uso de biocombustíveis (BRASIL, 2024b).

Cabe ressaltar um ponto importante da legislação do combustível do futuro, que foi a inclusão do SAF, visto que, até então, o marco normativo relacionado à biocombustíveis tinha como foco exclusivo o etanol e o biodiesel. O SAF, também denominado biojet ou BioQAV, é um biocombustível oriundo de biomassa *drop-in*, ou seja, pode substituir diretamente o combustível fóssil, em determinadas proporções, sem a necessidade de mudanças estruturais significativas nas aeronaves (EPE, 2024). Ainda, há grande variabilidade de tipos de biomassa e de rotas de produção a serem utilizadas, o que determina a viabilidade do biocombustível (MILANEZ *et al.*, 2021).

Todavia, dada a prontidão tecnológica atual e a baixa escala de produção, o custo do SAF é cerca de 20% superior ao do combustível fóssil, o que o torna menos atrativo em relação aos demais combustíveis disponíveis. Embora o uso do SAF em aeronaves seja estabelecido pela Resolução ANP nº 778/2019, que dispõe sobre as especificações de qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializam esses produtos em território nacional, são necessários incentivos financeiros para a indústria de biocombustíveis avançados, além de melhorias nos programas e regulamentações de bioquerosene na aviação, para impulsionar o consumo desse biocombustível no país (ANP, 2022b).

Como dito anteriormente, a diversificação dos combustíveis menos intensivos em carbono é um importante meio para a descarbonização do setor de transporte no Brasil e em Minas Gerais. Nesse sentido, destaca-se o Gás Natural Veicular (GNV), que é menos emissor quando comparado à gasolina e ao óleo diesel (CIBIOGÁS, sd). O GNV é um combustível proveniente do gás natural, destinado ao uso veicular e cujo componente principal é o metano (ANP, 2022c). O uso do GNV é uma alternativa que cresce no Brasil, devido à sua disponibilidade e aos menores preços se comparado aos demais combustíveis automotivos. Em Minas Gerais, por exemplo, há mais de 37 mil automóveis com o kit GNV instalado, sendo cerca de 4% concentrados na capital do estado (CIBIOGÁS, sd).

Adicionalmente, o GNV pode ser substituído por biometano, potencializando a redução de emissões dessa tecnologia. O biometano é um combustível renovável produzido a partir da purificação do biogás, que é originado pela decomposição de matéria orgânica, como resíduos agrícolas, dejetos animais e resíduos sólidos urbanos. Minas Gerais destaca-se nesta tecnologia, possuindo uma planta de biometano em funcionamento e quatro em construção, resultado de mais de R\$3 bilhões em investimentos (FIEMG, 2024). Além disso, entrará em operação a primeira unidade de produção de biometano do setor sucroalcooleiro do estado em Tupaciguara, no Triângulo Mineiro. O empreendimento visa, inicialmente, atender a frota



interna de veículos a diesel, porém, está prevista a ampliação do volume de biometano produzido para a venda (MORAES, 2024).

A política estadual do biogás e do biometano, disposta na Lei nº 24.396 de julho de 2023, prevê o aumento na utilização do biometano em serviços de transporte público no estado. A legislação estabelece, ainda, o incremento, em bases econômicas, sociais e ambientais, da participação do biogás e do biometano na matriz energética estadual e a promoção da sinergia entre a gestão eficiente dos resíduos sólidos e industriais e a geração de energias renováveis (MINAS GERAIS, 2023).

Por outro lado, é importante destacar que Minas Gerais também enfrenta significativos desafios para o aumento do uso do biogás e biometano no estado. Apesar dos investimentos direcionados à produção, ainda há um volume de investimentos a ser viabilizado para o aprimoramento tecnológico e a adequação da infraestrutura necessária à distribuição do biometano, além de melhorias regulatórias para deixar seu custo mais atrativo para o consumidor (ABREN, 2024).

## Hidrogênio de baixo carbono

Apesar de a utilização energética do hidrogênio ainda ser considerada uma tecnologia disruptiva, esta opção tem se destacado, em especial devido ao seu potencial de mitigação de emissões de GEE em diversos setores. No setor de transporte, por exemplo, o hidrogênio pode ser utilizado como combustível de veículos leves e pesados em diferentes modais: rodoviário, ferroviário e aéreo.

A obtenção do hidrogênio se dá por diferentes insumos e rotas de produção, o que determina a sua classificação. Por exemplo, o hidrogênio de baixo carbono é produzido a partir da eletrólise da água utilizando fontes renováveis de energia. Desse modo, o hidrogênio de baixo carbono é uma alternativa para a propulsão em veículos do modo rodoviário com emissão nula de escapamento em substituição ao uso dos combustíveis fósseis (CNT, 2023).

Do ponto de vista econômico, o hidrogênio de baixo carbono ainda demanda investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D), incluindo estudos para embasar a formulação de incentivos fiscais, a fim de aumentar sua competitividade em relação a outras formas de hidrogênio e demais combustíveis. Sob essa ótica, a Lei nº 14.948 de 2024, conhecida como o “marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono”, representa um avanço significativo para o mercado do hidrogênio no Brasil.

O marco legal dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono e a criação do Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). Além disso, a legislação traz incentivos para a indústria do hidrogênio e o Regime



Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro), que tem como objetivo estabelecer as bases para o desenvolvimento competitivo em escala nacional desse produto (BRASIL, 2024c).

Portanto, com a aprovação do marco legal, o Brasil dá uma sinalização importante para o desenvolvimento de projetos de hidrogênio no país, que já possui características geográficas vantajosas que favorecem a competitividade e o crescimento de uma nova indústria focada no hidrogênio de baixo carbono. No entanto, a ampliação da produção e do uso do hidrogênio de baixo carbono ainda exige um aporte financeiro considerável, seja por meio de incentivos fiscais ou de investimento em P&D, tanto para os produtores, quanto para os usuários potenciais no setor de transporte.

Em Minas Gerais, também em 2024, foi sancionada a Lei nº 24.940, estabelecendo a política estadual do hidrogênio de baixo carbono e do hidrogênio verde (MINAS GERAIS, 2024). A política visa fomentar a cadeia produtiva e o uso do hidrogênio de baixo carbono em diversos setores da economia local, como aplicações de fonte energética, produção de fertilizantes agrícolas e em transporte público (MINAS GERAIS, 2024).

A publicação dessa política coloca o estado em uma posição de destaque em relação aos demais, visto que a lei contempla a realização de estudos que visem incrementar a participação da energia de hidrogênio na matriz energética do estado, além de abordar a implementação de instrumentos fiscais e creditícios para a produção e a aquisição de equipamentos e materiais empregados em sistemas de produção e aplicação de hidrogênio de baixo carbono (MINAS GERAIS, 2024).

Destaca-se que o transporte eficiente do hidrogênio, equilibrando custos e preservando sua pureza, representa um desafio (U.S. Department of Energy, s.d.). Segundo a IRENA (2022), a amônia surge como uma solução viável para o transporte de hidrogênio em longas distâncias, especialmente por via marítima. Para distâncias curtas e, em alguns casos, médias, a utilização da infraestrutura de gasodutos já existente para o transporte de gás natural é uma alternativa promissora, desde que tecnicamente e economicamente viável.

No contexto de Minas Gerais, uma opção seria a aproveitamento e expansão da infraestrutura dutoviária atual. Outras opções a serem avaliadas incluem o transporte rodoviário com caminhões pesados para transportar amônia ou utilizar a liquefação do hidrogênio, assim como Transportadores de Hidrogênio Orgânico Líquido (LOHCs). Essas alternativas podem proporcionar uma solução para o transporte de hidrogênio, atendendo às eventuais futuras necessidades regionais e contribuindo para a descarbonização do setor energético.



## Aumento da eficiência energética e racionalização da matriz modal

Conforme mencionado, o transporte de passageiros em Minas Gerais é predominantemente rodoviário. Assim, a racionalização da matriz modal é parte importante da estratégia adotada pelo estado para a descarbonização do setor.

A transição de meios de transporte intensamente emissores, como carros particulares movidos a combustíveis fósseis, para meios menos emissores, como o transporte público, bicicletas e veículos elétricos, por exemplo, pode reduzir as emissões de GEE, além de melhorarem a eficiência da mobilidade urbana. Para tal, é necessária a integração física e tarifária dos diferentes tipos de transporte, visto que facilitar a transição entre eles pode aumentar a eficiência e a conveniência para os usuários. Para o transporte público, em especial, é importante investir para torná-lo mais eficiente e acessível, com a expansão dos sistemas atuais de transporte público, otimização das rotas e implantação de corredores exclusivos para ônibus (LA ROVERE *et al.* 2023).

A melhoria do transporte público urbano costuma enfrentar barreiras relacionadas à falta de linhas de crédito específicas para esse fim e aos modelos de concessão atuais, baseados unicamente em decisões econômicas e que, às vezes, não estão adaptados às novas tecnologias, dificultando a sua adoção no transporte público de cidades brasileiras (LA ROVERE *et al.*, 2023). Apesar desse contexto desafiador, medidas relacionadas à alteração da matriz modal estão previstas no Plano de Mobilidade Urbana da Região Metropolitana de Belo Horizonte (PlanMob – BH). Em relação ao transporte de passageiros, o PlanMob – BH possui as seguintes diretrizes:

- Estruturação de sistema de transporte coletivo tronco alimentado;
- Integração institucional, operacional e tarifária entre os modos e sistemas;
- Promoção da intermodalidade para viagens metropolitanas;
- Priorização dos modos ativos e coletivos em consonância com a Política Nacional de Mobilidade;
- Melhoria das ligações viárias perimetrais por meio de novas conexões (ARMBH e SEINFRA, 2024).

Ademais, em 2022 foi desenvolvido o Plano de Mobilidade Ativa, que também inclui entre suas diretrizes a promoção da intermodalidade, conexão entre as centralidades e o transporte de última milha, ações que podem ocorrer de forma eficiente por meio da ciclomobilidade (ARMBH, 2022).

Outros municípios de Minas Gerais podem utilizar como base as diretrizes do PlanMob – BH e do Plano de Mobilidade Ativa, adequando-as às suas especificidades, em especial o número



de habitantes e sua distribuição dentro dos municípios, além das características do transporte público existente. Este é um exemplo importante de uma medida de descarbonização que não envolve mudanças tecnológicas significativas, mas sim um olhar direcionado ao planejamento urbano que considere o seu impacto nas emissões do setor.



# CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS

A metodologia utilizada para classificar as tecnologias de redução de emissões de GEE do setor de transporte foi baseada na atribuição de notas de 1 (um) a 3 (três) para quatro critérios:

- Potencial de redução de emissões;
- Barreiras tecnológicas;
- Barreiras econômicas;
- Alinhamento às políticas climáticas.

Para o potencial de redução de emissões, notas mais altas foram atribuídas a tecnologias com maior capacidade de redução. Em contrapartida, para as barreiras tecnológicas e econômicas, a nota foi inversamente proporcional: quanto maior a barreira, menor a nota. Por fim, a pontuação para o alinhamento às políticas climáticas foi atribuída da seguinte forma:

- Nota 1, quando não foi possível identificar um alinhamento às políticas estaduais ou nacionais;
- Nota 2, quando foi possível identificar alinhamento às políticas nacionais ou estaduais;
- Nota 3, quando o alinhamento abarca políticas nacionais e estaduais.

Para cada um dos critérios citados, as notas foram estabelecidas a partir da avaliação dos documentos analisados, da expertise da WayCarbon e do potencial de expansão e das barreiras descritas nas seções anteriores deste diagnóstico. A Figura 5, a seguir, apresenta o detalhamento dos critérios e das notas, considerando a atribuição dos níveis “alto”, “médio” e “baixo” para cada nota possível dentro dos quatro critérios observados. Na sequência, na Tabela 3, as notas finais são apresentadas para cada uma das tecnologias.



Figura 5: Critérios de classificação das tecnologias de descarbonização

Potencial de redução de emissões		
1: Baixo	2: Médio	3: Alto
Categoria com emissões pouco significativas e/ou tecnologias que levarão a pequena redução de emissões	Categoria com emissões significativas e/ou tecnologias que levarão a redução significativa de emissões	Categoria com emissões muito significativas e/ou tecnologias que levarão a grande redução de emissões
Barreiras tecnológicas		
1: Alta	2: Média	3: Baixa
Projetos de P&D; Baixa maturidade tecnológica para implementação	Tecnologias adotadas por players internacionais ou em caráter experimental por players nacionais; Média maturidade tecnológica para implementação	Tecnologias implementadas por players nacionais; Alta maturidade tecnológica para implementação
Barreiras econômicas		
1: Alta	2: Média	3: Baixa
Tecnologias demandam altos investimentos públicos e privados	Tecnologias demandam investimentos públicos ou privados	Tecnologias demandam baixo investimento público ou privado
Alinhamento às políticas climáticas		
1: Baixo	2: Médio	3: Alto
Tecnologia ausente das duas políticas (nacional e estadual)	Tecnologia alinhada a somente uma das políticas (nacional ou estadual)	Tecnologia alinhada à política climática nacional e à estadual

Fonte: Elaboração própria



Tabela 3: Notas atribuídas às tecnologias avaliadas

Tecnologias	Potencial de redução de emissões	Barreiras tecnológicas	Barreiras econômicas	Alinhamento às políticas climáticas	Classificação
<b>Transporte de Carga</b>					
Aumento do uso de biodiesel em caminhão	1	3	3	3	27
Uso de HVO em caminhões	3	1	2	3	18
Uso de biometano caminhões	3	2	1	3	18
Eletrificação de caminhões	3	2	1	2	12
Uso de Bio-GNL em caminhões	3	1	1	2	6
Substituição do querosene de aviação por SAF	2	1	1	3	6
Uso de hidrogênio de baixo carbono em caminhões	3	1	1	1	3
Eletrificação de trens de carga	2	1	1	1	2
<b>Transporte de Passageiros</b>					
Aumento no uso de etanol em veículos leves	2	3	3	3	54
Eletrificação parcial de veículos leves	2	3	3	2	36
Eletrificação total de veículos leves	3	3	2	2	36
Incentivo no uso de biometano no GNV	2	3	2	3	36
Uso de biometano em ônibus	3	2	2	3	36
Aumento do uso de biodiesel em ônibus	1	3	3	3	27
Mudança de modal	1	3	3	3	27
Uso de HVO em ônibus	3	1	2	3	18
Eletrificação de ônibus	3	2	1	2	12
Uso de Bio-GNL em ônibus	2	1	3	2	12
Eletrificação a pilha combustível movido a etanol	3	1	1	1	3
Eletrificação a pilha combustível movido a hidrogênio	3	1	1	1	3
Uso de hidrogênio de baixo carbono em ônibus	3	1	1	1	3
Uso de hidrogênio de baixo carbono em veículos leves	3	1	1	1	3

Fonte: Elaboração própria



Importante notar que a multiplicação das quatro notas definiu a classificação das tecnologias, conforme modelo conceitual desenvolvido pela Accenture e adaptado pela WayCarbon, que se divide em 3 passos: mitigar a base, acelerar a transição e estender a fronteira (ACCENTURE, 2020).

- Tecnologias com pontuação maior ou igual a 37 foram classificadas como “mitigar a base”, indicando iniciativas simples e viáveis que podem, em alguns casos, trazer retorno financeiro;
- Tecnologias com pontuação entre 13 e 36 foram classificadas como “acelerar a transição”, referindo-se àquelas que possuem custos altos ou disponibilidade limitada no curto prazo, podendo dificultar a implantação imediata;
- Tecnologias com pontuação entre 1 e 12 foram classificados como “estender a fronteira”, representando inovações disruptivas que podem não estar disponíveis em larga escala, mas que serão fundamentais a longo prazo.

A avaliação das tecnologias resultou na classificação apresentada na Figura 6.

Figura 6: Resultado da avaliação das tecnologias



Fonte: Elaboração própria

A classificação das tecnologias apresentadas na Tabela 3 e na Figura 6 foram discutidas no workshop de engajamento com os integrantes do Grupo de Trabalho do setor de transporte do projeto Rota, a fim de coletar subsídios de atores relevantes do estado envolvidos em políticas e ações do setor. Esse processo permitiu o refinamento da classificação e o aprimoramento das análises realizadas pela WayCarbon, com base na avaliação de documentos e dados secundários.



## DESTAQUES E PRÓXIMOS PASSOS

As informações apresentadas neste diagnóstico destacam a importância do setor de transporte na descarbonização do estado de Minas Gerais. As tecnologias disponíveis mostram que há diversas estratégias possíveis para reduzir as emissões de GEE no setor, muito embora algumas tecnologias sejam mais apropriadas para fontes de emissão específicas, algo a ser observado na definição da estratégia – ou estratégias – que serão adotadas.

Nota-se, por exemplo, que tecnologias de eletrificação e de biocombustíveis foram classificadas em diferentes níveis, com base em sua aplicação. De fato, a aplicação de medidas de descarbonização em veículos leves enfrenta barreiras tecnológicas menores, o que, em muitos casos, implica custos menores de implementação. A eletrificação de veículos leves, por exemplo, foi classificada como uma das medidas necessárias para mitigar a base, enquanto a eletrificação dos veículos pesados é considerada uma alternativa desafiadora, podendo ser avaliada para o médio/longo prazo.

Apesar de mais desafiadores em termos de custo e tecnologia, algumas medidas com aplicação em veículos pesados obtiveram pontuações intermediárias. Nessa linha, vale citar o exemplo de caminhões a GNV e biometano, que já vêm sendo implementados em caráter experimental no Brasil. Por sua vez, o HVO, apesar de ainda ter uma produção baixa, é *drop-in* e não exige renovação da frota para a sua aplicação.

Por fim, medidas associadas à mudança de modal e ao aumento no uso de biodiesel, que demandam poucos avanços tecnológicos e investimentos mais baixos, obtiveram uma pontuação relativamente mais baixa. Isso se deve a um menor potencial de redução de emissões associado a esse tipo de tecnologia, quando comparado às demais tecnologias avaliadas.



## Próximos passos

Os pontos destacados neste diagnóstico evidenciam os avanços e os desafios tecnológicos e financeiros associados à descarbonização do setor de transporte em Minas Gerais, considerando a diversidade de estratégias e tecnologias avaliadas. Com base no conjunto de informações apresentadas no diagnóstico setorial, os próximos passos do projeto Rota buscam aprofundar as análises relativas a cada setor-chave do programa, por meio da elaboração de cenários de descarbonização e da priorização de ações estratégicas, alinhando as iniciativas aos potenciais de redução de emissões e à viabilidade econômica. Com isso, espera-se direcionar investimentos, em especial privados, para as soluções mais eficazes e aplicáveis ao contexto estadual em cada um dos setores-chave do Rota.

Mais especificamente, a próxima etapa do desenvolvimento do *roadmap* do setor de transporte será a de elaboração dos cenários de descarbonização, que tem como atividades principais:

- Análise e consolidação das metas;
- Avaliação das rotas tecnológicas e estimação de custos financeiros;
- Consulta aos atores do setor em análise;
- Definição de cenários de descarbonização (estudo quantitativo);
- Desenvolvimento de relatório síntese sobre os cenários elaborados.

Uma vez construídos os cenários, seguimos para as oportunidades de investimento, etapa na qual serão priorizadas ações de descarbonização – mapeadas a partir do diagnóstico setorial e dos cenários – e identificados custos e fontes de financiamento para viabilizar a sua implementação no estado de Minas Gerais. Essa etapa tem como atividades principais:

- Construção da curva marginal de abatimento para o setor em análise;
- Priorização de alternativas tecnológicas de descarbonização;
- Identificação de potenciais iniciativas e tecnologias de descarbonização para o setor;
- Validação do portfólio proposto de tecnologias de descarbonização com atores-chave;
- Estimativa de investimentos necessários;
- Construção de portfólio de investimentos;
- Identificação de fontes de investimento.



# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREN, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECICLAGEM DE ENERGIA. ABREN e FIEMG discutem caminhos para a produção sustentável do biogás e biometano em Minas Gerais, 2024. Disponível em: <https://abren.org.br/2024/05/28/abren-e-fiemg-discutem-caminhos-para-a-producao-sustentavel-do-biogas-e-biometano-em-minas-gerais/>. Acesso em: 07 out. 2024.

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

AGÊNCIA MINAS. Atração bilionária de investimentos pelo Vale do Lítio Impulsiona arrecadação revertida em melhorias para a população. 2024. Disponível em: <https://desenvolvimento.mg.gov.br/inicio/noticias/noticia/2432/atracao-bilionaria-de-investimentos-pelo-vale-do-litio-impulsiona-arrecadacao,-revertida-em-melhorias-para-a-populacao>. Acesso em: 14 out. 2024.

ANFAVEA, ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2020. 2020. Disponível em: . Acesso em: outubro, 2024.

ANM, AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. AMB Interativo. 2024. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojODIyOWJlMTgtZTBiNi00ODFhLWJiOGEtYzlmOWM3MjhmMWQ4IiwidCI6ImEzMDgzZTlxLTc0OWItNDUzNC05YWZhLTU0Y2MzMTg4OTdiOCJ9>. Acesso em: 14 out. 2024.

ANP, AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Mistura de biodiesel ao diesel passa a ser de 13% a partir de hoje (1/3). 2022a. Disponível em: [https://www.gov.br/anp/pt-br/canais\\_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/mistura-de-biodiesel-ao-diesel-passa-a-ser-de-13-a-partir-de-hoje-1-3](https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/mistura-de-biodiesel-ao-diesel-passa-a-ser-de-13-a-partir-de-hoje-1-3). Acesso em: 07 out. 2024

ANP, AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Publicadas novas resoluções da ANP sobre combustíveis de aviação. 2022b. Disponível em: [https://www.gov.br/anp/pt-br/canais\\_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/publicadas-novas-resolucoes-da-anp-sobre-combustiveis-de-aviacao](https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/publicadas-novas-resolucoes-da-anp-sobre-combustiveis-de-aviacao). Acesso em: 25 set. 2024.

ANP, AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução n. 906, de 2022: dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e as instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. 2022c. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n->



906-2022-dispoe-sobre-as-especificacoes-do-biometano-oriundo-de-produtos-e-residuos-organicos-agrossilvopastoris-e-comerciais-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-e-comerciais-a-ser-comercializado-em-todo-o-territorio-nacional?origin=instituicao. Acesso em: 07 out. 2024.

ANP. Levantamento de Preços de Combustíveis (últimas semanas pesquisadas). 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos-de-combustiveis-ultimas-semanas-pesquisadas>. Acesso em: 29 nov. 2024

ANP. Mapa dinâmico produtores de etanol. 2024b. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMmRhZWU2NDU0tZWE2Yi00NzI5LWJjMGQtNjIwNjE0MjM0MjEzIiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTl0YTYtNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzIxMyJ9>. Acesso em: 29 nov. 2024

ARMBH, Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte e SEINFRA, Secretaria Estadual de Infraestrutura e Obras. Plano de Mobilidade da Região Metropolitana de Belo Horizonte. 2024. Disponível em: <http://www.infraestrutura.mg.gov.br/images/documentos/plano-mobilidade/resumo-executivo/planmob2.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2025.

ARMBH, Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Plano de Mobilidade Ativa da Região Metropolitana de Belo Horizonte: Resumo Executivo. 2022. Disponível em: [http://www.infraestrutura.mg.gov.br/images/documentos/plano-mobilidade/planos-setoriais/plano-metropolitano-mobilidade-ativa/Resumo\\_Executivo.pdf](http://www.infraestrutura.mg.gov.br/images/documentos/plano-mobilidade/planos-setoriais/plano-metropolitano-mobilidade-ativa/Resumo_Executivo.pdf). Acesso em 17 jan. 25.

BRASIL. Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Anuário estatístico de tráfego aéreo. 2015. Disponível em: [https://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario\\_estatistico/anuario\\_estatistico\\_2015.pdf](https://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2015.pdf). Acesso em: 07 out. 2024.

BRASIL. Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Anuário estatístico de tráfego aéreo. 2019. Disponível em: [https://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario\\_estatistico/anuario\\_estatistico\\_2019.pdf](https://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2019.pdf). Acesso em: 09 out. 2024.

BRASIL. Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Anuário estatístico de tráfego aéreo. 2021. Disponível em: [https://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario\\_estatistico/anuario\\_estatistico\\_2021.pdf](https://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2021.pdf). Acesso em: 09 out. 2024.



BRASIL. Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Anuário estatístico de tráfego aéreo. 2023. Disponível em: [https://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario\\_estatistico/anuario\\_estatistico\\_2023.pdf](https://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2023.pdf). Acesso em: 09 out. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. 2012. Disponível em: [http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw\\_Identificacao/lei%2012.651-2012?OpenDocument](http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/lei%2012.651-2012?OpenDocument). Acesso em: 15 jan. 2025.

BRASIL. Contribuição Nacionalmente Determinada – NDC. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2024a. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/2024-11/Brazil\\_Second%20Nationally%20Determined%20Contribution%20%28NDC%29\\_November2024.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/2024-11/Brazil_Second%20Nationally%20Determined%20Contribution%20%28NDC%29_November2024.pdf). Acesso em: 21 jan. 2025.

BRASIL. Presidência da República. Presidente Lula sanciona Lei do Combustível do Futuro para promover a mobilidade sustentável. 2024b. 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.

BRASIL. Lei nº 14.948, de 25 de setembro de 2024. Dispõe sobre o marco legal do hidrogênio de baixa emissão. 2024c. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm). Acesso em: 26 set. 2024.

CIBIOGÁS. Biogás x outros gases: qual a diferença entre GLP, GN, GNV e biometano? Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/biogas-x-outros-gases-qual-a-diferenca-entre-glp-gn-gnv-e-biometano/>. Acesso em: 07 out. 2024.

CNT. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Hidrogênio Renovável. Brasília, DF: CNT, 2023. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/d0b37807-75c4-494d-a296-1e050d5755b3>. Acesso em: 26 set. 2024.

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

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Combustíveis Sustentáveis de Aviação no Brasil. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/combustiveis-sustentaveis-de-aviacao-no-brasil-perspectivas-futuras>. Acesso em: 21 jan. 2025.



FIEMG, FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Desafios e perspectivas do biogás e biometano. 2024. Disponível em: <https://www.fiemg.com.br/noticias/desafios-e-perspectivas-do-biogas-e-biometano/>. Acesso em: 07 out. 2024

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama Estadual - Minas Gerais. Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama>. Acesso em: 9 set. 2024.

IEA – International Energy Agency. Batteries and Secure Energy Transitions. 2024. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb39c1bf-d2b3-446d-8c35-aae6b1f3a4a0/BatteriesandSecureEnergyTransitions.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2024.

IRENA. International Renewable Energy Agency. Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part II Technology review of hydrogen carriers. 2022. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA\\_Global\\_Trade\\_Hydrogen\\_2022.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_Global_Trade_Hydrogen_2022.pdf)

LA ROVERE *et al.* Projeto Decarboost: Viabilização de investimentos na transição para uma sociedade de baixo carbono em países latino-americanos. 2023. Disponível em: [https://www.centroclima.coppe.ufrj.br/images/documentos/Plano\\_Mitiga%C3%A7%C3%A3o\\_Sector\\_Transporte\\_-\\_Estrat%C3%A9gia\\_Descarboniza%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://www.centroclima.coppe.ufrj.br/images/documentos/Plano_Mitiga%C3%A7%C3%A3o_Sector_Transporte_-_Estrat%C3%A9gia_Descarboniza%C3%A7%C3%A3o.pdf). Acesso em: 23 jan. 2025.

MAPBIOMAS. Coleção 9: série anual de mapas de cobertura e uso de solo do brasil. Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/estatisticas/Brasil>. Acesso em: 15 jan. 2025.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Relatório de avaliação de necessidades tecnológicas para implementação de planos de ação climática no Brasil: mitigação. Brasília: MCTI, 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: 25 set. 2024.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. SIRENE: Sistema de Registro Nacional de Emissões. Brasília: MCTI, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene>. Acesso em: 23 jan. 2025.

MILANEZ, Artur Yabe et al. Biocombustíveis de aviação no Brasil: uma agenda de sustentabilidade = Aviation biofuels in Brazil: an agenda of sustainability. REVISTA DO BNDES, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, p. [361]-398, ed. esp., dez. 2021. Disponível em:



[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22048/1/PR\\_Biocombustiveis%20de%20A via%C3%A7%C3%A3o%20no%20Brasil\\_Revista%20BNDES\\_n.%2056.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22048/1/PR_Biocombustiveis%20de%20A via%C3%A7%C3%A3o%20no%20Brasil_Revista%20BNDES_n.%2056.pdf). Acesso em: 21 jan. 2025.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Mobilidade (SEINFRA). Plano Estratégico Ferroviário de Minas Gerais. s.d. Disponível em: [http://www.infraestrutura.mg.gov.br/images/documentos/infraestrutura-ferroviaria/01\\_plano\\_estrategico\\_ferroviario/01\\_pef/Relatorio\\_PEF\\_Minas\\_2021.pdf](http://www.infraestrutura.mg.gov.br/images/documentos/infraestrutura-ferroviaria/01_plano_estrategico_ferroviario/01_pef/Relatorio_PEF_Minas_2021.pdf) Acesso em: 10 dez. 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. Disponível em: <https://americadosul.iclei.org/wp-content/uploads/sites/78/2023/06/relatorio-inventario-mg.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2025.

MINAS GERAIS. Lei n. 24.396, de 2023. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/LEI/24396/2023/>. Acesso em: 07 out. 2024.

MINAS GERAIS. Lei nº 24.940, de 2024. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/LEI/24940/2024/>. Acesso em: 01 out. 2024

MMA. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Acordo de Paris. s.d. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em 20 jan. 2025

MORAES, Marcílio de. Minas terá a primeira usina de biometano no Triângulo. Estado de Minas, 2024. Disponível em: <https://www.em.com.br/colunistas/marcilio-de-moraes/2024/06/6869119-minas-tera-a-primeira-usina-de-biometano-no-triangulo.html>. Acesso em: 07 out. 2024.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/> . Acesso em: 17 jan. 2025.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (IPCC). Mudança do Clima - Relatório Síntese. 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy\\_of\\_IPCC\\_Longer\\_Report\\_2023\\_Portugues.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf). Acesso em: 20 ago. 2024.

SILVA, Affonso Celso Aldeia Caiazzo da; PIZZOLATO, Nélio Domingues. Using electric vehicles for freight transport purposes and challenges to do an implementation in Brazil. Ambiente & Sociedade, São Paulo, v. 25, 2022. Disponível em:



<https://www.scielo.br/j/asoc/a/3r756JfkJb33gnwvzpfQDdd/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 25 set. 2024.

U.S. Department of Energy. Hydrogen Delivery. s.d. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-delivery>. Acesso em: 17 fev. 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. Climate Watch. 2024. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/>. Acesso em: 18 out. 2024.



# **Bruna Araújo**

bruna.araujo@waycarbon.com

# **Camila Leotti**

camila.leotti@waycarbon.com

# **Carolina Souza**

carolina.souza@waycarbon.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

