

RELATÓRIO DE EXECUÇÃO DO OBJETO

P2.1 – DIAGNOSTICO SETORIAL ENERGIA

Referência: INVESTMINAS/CT/25/2024

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



**INVEST
MINAS**

WV/CARBON

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

Diagnóstico Setorial – Energia



Sumário

ACRÔNIMOS.....	5
INTRODUÇÃO.....	8
CONTEXTUALIZAÇÃO	9
Desafios e oportunidades da agenda climática no Brasil e em Minas Gerais	9
Enfrentamento dos desafios climáticos em Minas Gerais.....	12
DIAGNÓSTICO SETORIAL – ENERGIA.....	16
Contextualização sobre as emissões do setor em Minas Gerais.....	17
Benchmarking das tecnologias previstas nos planos estaduais e municipais de descarbonização	20
O setor de energia no PLAC e no PD de Minas Gerais.....	21
Soluções e barreiras para redução de emissões no setor de energia	24
Geração de eletricidade.....	26
Produção de hidrogênio de baixo carbono.....	28
Armazenamento de energia em sistemas de baterias	30
Biocombustíveis.....	31
REGAP e o caminho para o <i>Net Zero</i>	32
CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS	35
DESTAQUES E PRÓXIMOS PASSOS	39
Próximos passos.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41



Índice de figuras

Figura 1: Representatividade das emissões por setor - BR e MG.....	10
Figura 2: Fontes de emissão e composição dos setores avaliados no programa Rota	16
Figura 3: Emissões do setor de energia mundiais e brasileiras.....	18
Figura 4: Capacidade instalada de Minas Gerais (geração centralizada e distribuída).....	19
Figura 5: Potenciais impactos e vulnerabilidades do sistema energético brasileiro frente às mudanças climáticas.....	25
Figura 6: Critérios de classificação das tecnologias.....	36
Figura 7: Resultado da avaliação dos projetos das tecnologias	38

Índice de tabelas

Tabela 1: Ações propostas pelo PLAC-MG e PD-MG para a descarbonização do setor energético até 2050.	22
Tabela 2: Metas de refino de petróleo em Minas Gerais	34
Tabela 3: Notas atribuídas às tecnologias avaliadas	37



ACRÔNIMOS

ACL – Ambiente de contratação livre

AFOLU – Agropecuária, Floresta e Outros Usos da Terra

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BIO-CCS – Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono

BOE – barrel of oil equivalent (barril de petróleo equivalente)

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CCS – Carbon capture and storage (captura e armazenamento de carbono)

CCUS – Carbon capture, use and storage (captura, armazenamento e uso de carbono)

CGH – Central Geradora Hidrelétrica

CH₄ – Gás Metano

CHAMP – Coalition for High Ambition Multilevel Partnerships (Parcerias Multinível de Alta Ambição para a Ação Climática)

CO₂ – Dióxido de Carbono

CO₂e – Dióxido de Carbono equivalente

COP 21 – 21ª Conferência das Partes signatárias da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC)

EOL – Eólica

FCC – Fluid catalytic cracking (cracking catalítico)

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais

FT-BtL – Fischer-Tropsch Biomass to Liquids (biomassa para líquido)

FUT – Fator de utilização

FV – Fotovoltaico

GD – Geração distribuída



GEE – Gás de Efeito Estufa

GLP – Gás liquefeito do petróleo

IEF – Instituto Estadual de Florestas

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

IPPU – Industrial Processes and Product Use (Processos Industriais e Uso de Produtos)

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

LULUCF – Land Use, Land-use Change, Forestry (Uso da Terra, Mudanças no Uso da Terra e Floresta)

MtCO₂e – Milhão de tonelada de CO₂ equivalente

NDCs – Contribuições Nacionalmente Determinadas

PD-MG – Plano de Descarbonização para o Estado de Minas Gerais

PEMC-MG – Política Estadual sobre Mudanças Climáticas

PCH - Pequenas centrais hidrelétricas

PLAC-MG – Plano de Ação Climática de Minas Gerais

QAv – Querosene de aviação

REGAP – Refinaria Gabriel Passos

SAF – Combustível Sustentável de Aviação

SEDE – Secretaria de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa

SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

SIN – Sistema Interligado Nacional

UFV – Usinas fotovoltaicas

UGH – Unidades de Geração de Hidrogênio

UHE – Usinas hidrelétricas



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

UTE – Usinas termelétricas



INTRODUÇÃO

Este documento tem como objetivo apresentar um diagnóstico inicial para o setor de energia no estado de Minas Gerais, compondo o *roadmap* setorial em desenvolvimento no âmbito do programa Rota da Descarbonização¹.

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 energia 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 energia;
- **Seção 3:** apresenta a classificação de tecnologias existentes para a descarbonização do setor de energia 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.

¹ 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 CO₂e, 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

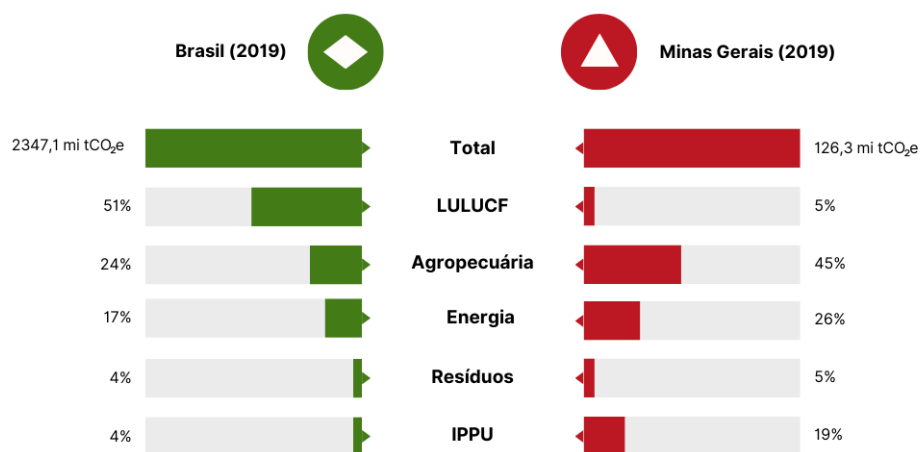


resiliência climática. Em 2025, o Brasil será o anfitrião da COP 30, o que oferece ao país a oportunidade de se posicionar como liderança climática no cenário internacional, apresentando compromissos e ações ambiciosas. Esse movimento envolve a revisão das políticas nacionais visando o atingimento das 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 CO₂e, 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 na 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 estacionária², 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.

² 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 – ENERGIA”.



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 de energia, primeira etapa do *roadmap* para esse setor, será detalhado na próxima seção deste documento.

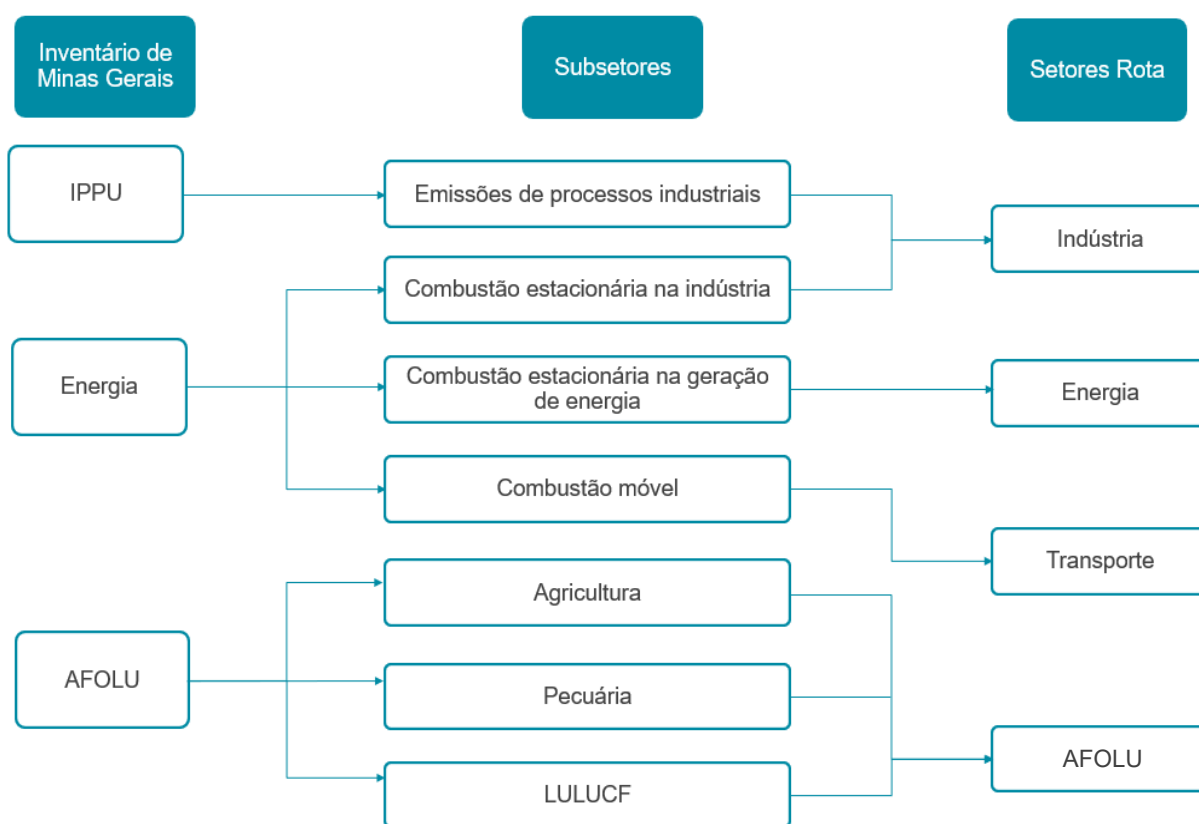
A evolução nas políticas climáticas do estado e os avanços nas ações de implementação, a exemplo do Rota e da ferramenta de MRV Climático, evidenciam o potencial de Minas Gerais de se consolidar como referência na agenda climática, algo particularmente relevante no contexto da COP 30, a ser realizada 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 – ENERGIA

Para a construção do *roadmap* do Rota, a avaliação das fontes de emissão associadas ao setor de energia no estado de Minas Gerais usou uma classificação por setores econômicos. De forma geral, o setor de energia irá endereçar as emissões relacionadas à geração de energia elétrica, à produção de combustíveis e biocombustíveis e ao refino de petróleo. Para os demais, a classificação adotada é: (i) setor de transporte endereça as emissões relacionadas à combustão móvel; (ii) 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; e (iii) setor de AFOLU inclui 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 programa Rota



Fonte: Elaboração própria



Contextualização sobre as emissões do setor em Minas Gerais

As emissões de gases de efeito estufa associadas ao consumo de energia³ no mundo somam 78% das emissões totais, constituindo a principal fonte de emissão gerada pela ação do homem em 2019. A geração de calor e eletricidade responde por 42% do total de emissões do setor, seguida por transporte, com 23% das emissões, e fabricação e construção, com 17% do total das emissões (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2024).

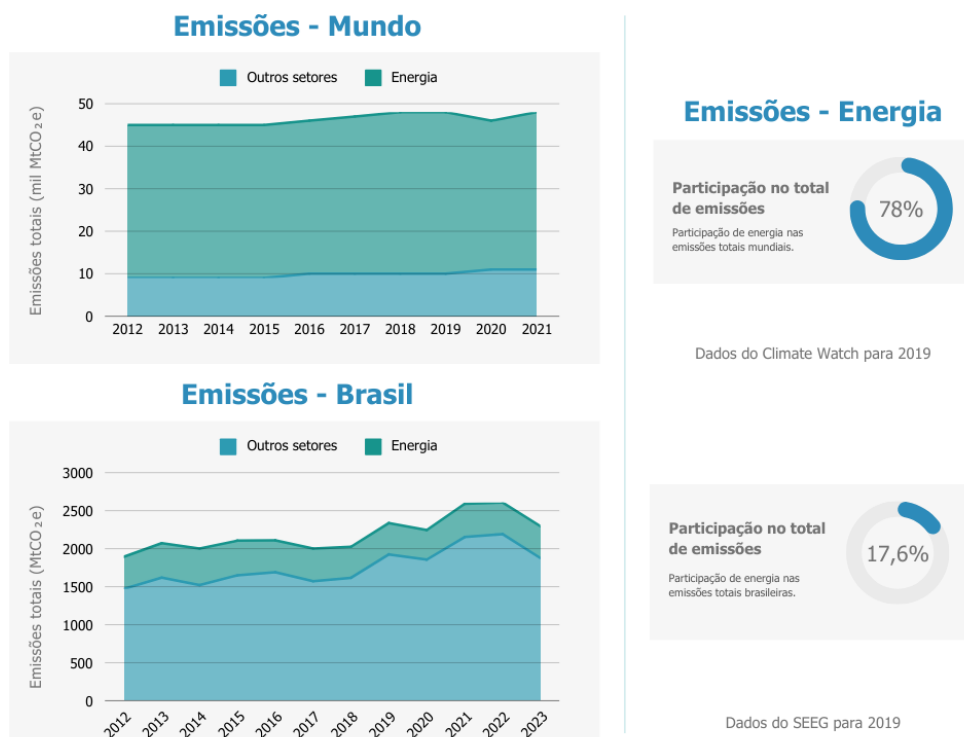
O setor de energia representa as emissões da produção, transformação, distribuição e consumo de diferentes formas de energia e, em muitas análises, englobam também as emissões da produção e do consumo de combustíveis relacionados aos setores de transporte, indústria e agropecuária. Além disso, as emissões relacionadas ao consumo energético no setor comercial, público e residencial também são comumente incluídas na contabilização setorial. Considerando todos esses diferentes subsetores, as emissões nacionais ligadas à energia totalizaram 411,7 MtCO₂e em 2019⁴, o que corresponde a 17,6% do total emitido no Brasil naquele ano. Dentro do setor, a atividade de maior contribuição é o de transportes, seguido pelas indústrias e a produção de combustíveis. A geração de eletricidade, em quarto lugar, correspondeu a 38 MtCO₂e, equivalente a 9,3% do setor e 1,6% do total do país (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024). A Figura 3 apresenta um comparativo entre as emissões de energia do Brasil e do mundo.

³ Incluindo transporte, eletricidade e geração de calor, edifícios, fabricação e construção, emissões fugitivas e outras queimas de combustível.

⁴ Apesar de os dados nacionais estarem atualizados até 2023, o último ano de inventário de emissões de Minas Gerais foi 2019. Por isso, as comparações são feitas com base nesse ano.



Figura 3: Emissões do setor de energia mundiais e brasileiras



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

Em Minas Gerais, o cenário no macro setor de energia apresenta particularidades em relação ao panorama nacional. Em 2019, o setor foi responsável por 34 MtCO₂e, correspondendo a 21,8% das emissões estaduais. A geração de eletricidade corresponde a apenas 1,8% das emissões totais do setor, posicionando essa atividade como a sexta maior em emissões energéticas no estado, atrás daquelas oriundas das atividades de transporte, indústria, agropecuária, consumo residencial e produção de combustíveis (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024).

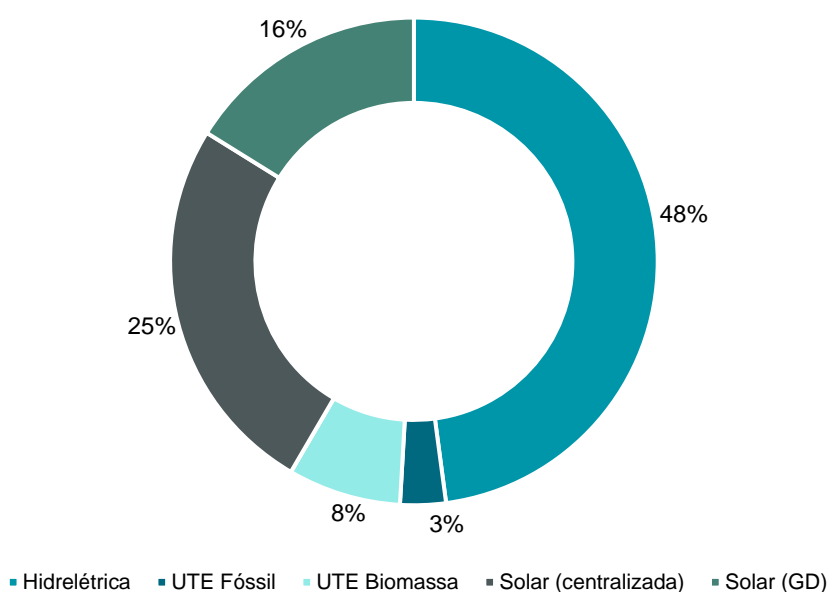
Para o desenvolvimento do *roadmap* do Rota, as emissões energéticas das indústrias, da agropecuária e dos transportes serão contempladas dentro dos próprios setores. Logo, o setor de energia incluirá as emissões do processo de geração de eletricidade, da produção de combustíveis e biocombustíveis e do refino de petróleo. Essa abordagem segue o mesmo padrão de análises já estabelecidas para o estado, como o Plano de Descarbonização de Minas Gerais (PD).

Em relação à eletricidade, em 2023, aproximadamente 9,4% da geração nacional foi oriunda de Minas Gerais, considerando geração distribuída (GD) e centralizada (EPE, 2024). O estado possui aproximadamente 11% da capacidade instalada de geração do país, com 28,3 GW (ANEEL, 2024a e 2024b). As tipologias de geração que compõem a matriz se dividem entre



usinas fotovoltaicas centralizadas (UFV); usinas eólicas (EOL); usinas termelétricas (UTE) a combustível fóssil e a biomassa; usinas hidrelétricas (UHE); pequenas centrais hidrelétricas (PCH); e centrais geradoras hidrelétricas (CGH). Em Minas Gerais, 48% da capacidade instalada é composta por hidrelétricas (44% UHE, 3% PCH e 1% CGH), 41% de solar (25% centralizada, 16% GD⁵), 8% de térmicas à biomassa e 3% de usinas térmicas fósseis, conforme demonstrado na Figura 4 (ANEEL, 2024a e 2024b). Há, ainda uma única usina eólica em operação no estado, de 156 kW, e geração distribuída com origem hídrica e de biomassa, mas que correspondem a aproximadamente 66 kW de capacidade instalada (0,2% do total), sendo fontes menos significativas na geração estadual.

Figura 4: Capacidade instalada de Minas Gerais (geração centralizada e distribuída)



Fonte: Elaboração própria com base em ANEEL (2024a e 2024b)

No estado, as emissões da produção de combustíveis fósseis estão concentradas na refinaria de petróleo Gabriel Passos (REGAP), localizada em Betim, que será estudada nas seções seguintes. Além do refino de petróleo, a produção de biocombustíveis também contribui com as emissões setoriais através de refinarias específicas. Em função da elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica, as emissões de GEE do setor energético mineiro representaram apenas 3,3% do total de emissões do estado em 2020. Esse valor considera

⁵ A capacidade instalada em geração distribuída em Minas Gerais é composta por usinas fotovoltaicas (99,6%), CGHs (0,7%) e UTEs a biomassa (0,7%).



a produção de combustíveis, a geração de eletricidade e o refino de petróleo, conforme o Plano de Descarbonização de Minas Gerais (PD)⁶.

Dos 5,71 MtCO₂e emitidos pelo setor em 2020, 57,3% são relativos à geração de eletricidade, 41,5% ao refino de petróleo e 1,2% à produção de biocombustíveis (COPPE-UFRRJ/UFMG/USP, 2022). As emissões da geração de energia elétrica são atribuídas às usinas térmicas que o estado possui, que são abastecidas de gás natural e biomassa. Já as emissões de refino de petróleo são associadas ao processamento realizado pela REGAP. Por fim, a emissão de biocombustível refere-se ao consumo e processamento de biodiesel nas unidades produtoras desse combustível.

Benchmarking das tecnologias previstas nos planos estaduais e municipais de descarbonização

Considerando o perfil diversificado das emissões energéticas mineiras, o estado deve considerar um conjunto amplo de iniciativas de descarbonização para o cumprimento de seus compromissos climáticos. Nesse contexto, esta seção buscou avaliar as melhores práticas previstas nos planos de descarbonização de governos estaduais existentes no Brasil, a saber, Pernambuco, Espírito Santo, São Paulo e Minas Gerais, e no plano municipal do Rio de Janeiro. Além dos planos, outras tecnologias de benchmarking adaptáveis para o contexto atual de Minas Gerais também foram consideradas.

Como ação central para a descarbonização do setor energético, todos os planos estaduais citados incluem o fomento à geração renovável, principalmente solar e eólica. Apesar de em sua maioria os estados analisados serem costeiros, apenas o Espírito Santo citou o aproveitamento do potencial eólico *offshore*. O estado inclui, ainda, o estímulo à compra de energia oriunda de fontes renováveis no mercado livre de energia (Ambiente de Contratação Livre, ACL). De maneira mais específica, o município do Rio de Janeiro cita a compra de renováveis no ACL para edificações municipais.

Por outro lado, Pernambuco destaca o papel da geração distribuída entre as ações centrais do seu plano. Similarmente, o Rio de Janeiro inclui entre suas ações o aumento do uso de energia fotovoltaica em edifícios residenciais. Além disso, o município também enfatiza a

⁶ O último inventário público de Minas Gerais se refere às emissões de 2019, sendo esse o ano base para os outros diagnósticos do *roadmap* do Rota. Especificamente para energia, foram utilizados os dados de 2020 oriundos do PD, já que esses dados apresentam a melhor abertura para a projeção de cenários para o setor, devido à segregação das emissões da produção de biocombustíveis. Outra fonte utilizada para a construção dos diagnósticos do Rota foi o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) do Observatório do Clima, que, assim como o inventário, não apresenta dados estaduais sobre a emissão de biocombustíveis.



importância do aumento da eficiência energética em edifícios e na iluminação pública, como o uso de LED. O tema da eficiência em edificações de baixo carbono também é citado no plano do Espírito Santo.

Outro tema recorrente nos planos estaduais é a captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS, na sigla em inglês), que, apesar de abranger também o setor industrial, é relevante ao setor energético, compondo os planos do Espírito Santo, Pernambuco e São Paulo. Pernambuco apresenta um direcionamento da captura e armazenamento de carbono (CCS, na sigla em inglês) para o uso na produção de hidrogênio, nas refinarias e no processo de biocombustíveis, enquanto São Paulo dedica o CCS somente para as atividades industriais.

Sobre biocombustíveis, São Paulo destaca a geração de energia a partir de biomassa como uma de suas principais ações para a descarbonização. O tema também é citado pelos estados de Espírito Santo e Pernambuco, que destacam também a obtenção e uso de biogás/biometano. O estado pernambucano direciona o processamento de biometano nas unidades de geração de hidrogênio das refinarias como uma estratégia de descarbonizar essas infraestruturas, pois substitui o uso do gás natural. Soma ao plano para as refinarias a restrição do uso de petróleo e o coprocessamento do óleo vegetal na unidade de hidrotratamento de instáveis de refinarias. Em relação aos combustíveis, Pernambuco destaca a ampliação da produção de novos biocombustíveis sustentáveis, como diesel verde, bioquerosene de aviação, além do aumento da produção já existente de etanol. O processamento dos biocombustíveis ocorreria com a captura de carbono (CCS).

O setor de energia no PLAC e no PD de Minas Gerais

Minas Gerais tem implementado diversas iniciativas focadas na descarbonização do setor de energia como parte de suas metas de neutralidade climática. A principal estratégia está delineada no Plano de Ação Climática de Minas Gerais (PLAC-MG), de 2023, e no Plano de Descarbonização (PD) para o Estado de Minas Gerais dentro de um Brasil clima neutro em 2050 (PD-MG), de 2022.

Elaborado com foco em ações de mitigação e adaptação, integrando inovação e os princípios de justiça climática, o PLAC apresenta 28 ações prioritárias para o estado, divididas em 12 setores estratégicos. A priorização foi feita a partir de lacunas identificadas em planos e projetos estaduais, de projeções do PD e, especialmente, a partir de um processo



participativo⁷. As ações selecionadas refletem aquelas de maior potencial de redução de emissões, assim como feito no PD.

No PLAC, o setor de energia conta com duas ações principais, desdobradas em oito subações. As ações e medidas propostas pelo PLAC e, adicionalmente, pelo PD estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1: Ações propostas pelo PLAC-MG e PD-MG para a descarbonização do setor energético até 2050.

<p>Plano Estadual de Ação Climática de Minas Gerais (PLAC-MG)</p>	<p>Ação 1: Promover ações de aumento da eficiência energética</p>	<p>Subação 1: Promover a ampliação da eficiência energética nas edificações públicas estaduais.</p>
		<p>Subação 2: Tornar a eficiência energética um requisito nas licitações de compras públicas e editais de projetos de infraestrutura.</p>
		<p>Subação 3: Criar o Programa Estadual de Tecnologias de Baixo Carbono e Eficiência Energética.</p>
	<p>Ação 2: Promover a expansão de fontes limpas e renováveis na matriz energética estadual.</p>	<p>Subação 1: Fomentar a produção de biocombustíveis avançados, em especial bioquerosene para aviação e o diesel verde.</p>
		<p>Subação 2: Fomentar o consumo de energia elétrica de fonte renovável em edificações públicas.</p>
		<p>Subação 3: Fomentar a autogeração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, a cogeração com fonte não fóssil e a energia residual na indústria.</p>
		<p>Subação 4: Expandir a capacidade instalada de geração elétrica através de fontes limpas.</p>
		<p>Subação 5: Fomentar a produção e o consumo de biogás e biometano.</p>
<p>Plano de Descarbonização para o Estado de Minas Gerais dentro de um Brasil clima neutro em 2050</p>	<p>Solução 1: Expansão da geração centralizada através da expansão das instalações eólicas, fotovoltaicas flutuantes, fotovoltaicas em pastagens altamente degradadas e de biomassa.</p>	
	<p>Solução 2: Expansão da geração distribuída através da expansão das instalações fotovoltaicas no setor residencial e de Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH).</p>	

⁷ Esse processo se deu em 50 encontros, incluindo oficinas públicas regionais e reuniões setoriais, e uma consulta pública que registrou 760 participações. No total, registraram-se 930 contribuições ao processo, evidenciando a sua robustez.



Solução 3: Implementação de medidas para aumento de eficiência energética na Refinaria Gabriel Passos (REGAP), como a redução do fator de utilização (FUT) e a troca do óleo combustível por gás natural. Na geração de hidrogênio, a substituição de gás natural por biometano e a instalação de CCS. Na unidade de craqueamento catalítico fluidizado (*fluid catalytic cracking*, FCC), instalação de CCS.

Solução 4: No setor de biocombustíveis, o uso de resíduos agroflorestais para cogeração em plantas de biodiesel e a captura de carbono em plantas de etanol e do tipo *Biomass-to-Liquids* (FT-BtL).

Fonte: *Elaboração própria com base em Minas Gerais (2023) e COPPE-UFRJ/UFMG/USP (2022)*

O PLAC apresenta projeções de emissões líquidas totais para o estado no cenário de referência e no cenário onde o estado zera suas emissões em relação aos níveis de 2020. Com as medidas de descarbonização do setor de energia propostas, projeta-se uma redução de 24,3% nas emissões líquidas do setor até 2050 em comparação com o ano-base 2020, com uma redução intermediária de 1% entre 2020 e 2030.

Já o PD projeta uma redução significativa das emissões ligadas à geração elétrica e à produção de combustíveis no estado, pautando-se, principalmente, no uso de fontes renováveis e na captura de carbono na produção de biocombustíveis. Além de reduzir as emissões diretamente ligadas à energia, o plano coloca o setor como central para a descarbonização do estado, devido a seu potencial de captura de carbono. Suas emissões negativas de mais de 50 MtCO_{2e} são cruciais para o atingimento da meta *Net Zero* até 2050.

No entanto, desde que os planos foram construídos, novas tecnologias e oportunidades de descarbonização foram desenvolvidas e seguem sendo estudadas e aperfeiçoadas. Como exemplos, é possível citar as perspectivas de produção de hidrogênio de baixo carbono, o armazenamento de energia por baterias de alta tensão, a ampliação dos planos para o CCS e o desenvolvimento da energia eólica, ainda embrionária no estado. Dessa forma, os próximos itens trazem o mapeamento das soluções, já listadas e novas, para redução de emissões a serem contempladas nas etapas posteriores de desenvolvimento do *roadmap* setorial de energia.

Vale ressaltar que nem todas as medidas listadas na Tabela 1 serão contempladas com maior aprofundamento ao longo do projeto. Como a classificação adotada para a composição do setor de energia do Rota tem como foco a geração de energia elétrica e a produção de combustíveis, ações voltadas ao aumento de eficiência no consumo de energia em edificações, residências e, de maneira geral, no setor terciário⁸ não devem ser priorizadas.

⁸ Setor em que estão concentradas todas as atividades relacionadas a comércio e serviços. Em geral, o setor abrange o que não está no primário, de extração de matérias primas, ou no secundário, de indústrias.



Além disso, as soluções voltadas ao autoconsumo industrial e de instalações agropecuárias serão incluídas em seus respectivos diagnósticos setoriais.

Por fim, cabe destacar uma característica geral do plano de descarbonização de Minas Gerais, que impacta todos os setores: a ausência de aprofundamento da discussão sobre financiamento dessas tecnologias. O plano calcula o custo marginal de abatimento das medidas propostas, porém não aborda oportunidades de financiamento ou de incentivos fiscais que possam estimular a implementação de projetos de descarbonização pelo setor privado, consoante com o abordado por Espírito Santo e por São Paulo. Esse é um dos objetivos centrais do Rota, cujo *roadmap* setorial incluirá a identificação fontes de financiamento e de oportunidades de investimento nas próximas etapas de seu desenvolvimento.

Soluções e barreiras para redução de emissões no setor de energia

O Brasil se destaca em emissões de GEE no setor energético por sua matriz diversificada e renovável, em comparação às emissões mundiais. Em 2023, por exemplo, 93,1% da geração nacional de eletricidade foi de origem renovável, enquanto, no mundo, esse percentual foi de somente 30,2% (MME, 2024a). No entanto, a previsão de melhoria nos padrões socioeconômicos no Brasil pode levar a um aumento nas emissões do setor até 2034, especialmente com a possível expansão da capacidade instalada de termelétricas fósseis (EPE, 2024a).

Algumas políticas públicas têm favorecido o uso de termelétricas a gás natural e carvão mineral, indo na contramão dos esforços para ampliar a energia proveniente de fontes renováveis. De forma geral, a justificativa para esse movimento se baseia na segurança energética e confiabilidade do sistema, como, por exemplo, nos casos das leis federais n. 14.182/2021 e n. 14.299/2022, além do projeto de lei n. 4.653/2023 (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024).

Todavia, o setor energético brasileiro já enfrenta diversos desafios decorrentes das mudanças climáticas, com a crescente frequência e impactos significativos de eventos extremos exercendo pressão sobre o setor, afetando a geração, a distribuição e até mesmo os padrões de consumo (EPE, 2024a). A alteração em padrões de temperatura e precipitação implicam em restrição hídrica e conseqüente impacto na geração hidrelétrica, na redução de eficiência e capacidade de plantas termelétricas, redução de eficiência de linhas e transformadores, além de aumento na demanda por refrigeração. Por sua vez, alterações nos padrões de ventos impactam a geração eólica e podem trazer danos às estruturas de transmissão.



Mudanças nos padrões de radiação impactam a geração de energia solar, entre outras implicações, como é ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Potenciais impactos e vulnerabilidades do sistema energético brasileiro frente às mudanças climáticas



Fonte: Elaboração própria com base em EPE (2024a)

Dos elementos climáticos citados, alguns possuem efeitos agravados em Minas Gerais, principalmente o impacto dos padrões de precipitação nos reservatórios hidrelétricos e recursos bioenergéticos. Anos de escassez hídrica tem causado impactos significativos na geração hidrelétrica no estado, impactando o volume útil de diversos reservatórios (ANA, 2024). Em julho de 2021, por exemplo, alguns reservatórios da Cemig atingiram o pior volume já verificado para o período (CEMIG, 2021).

O regime de chuvas de 2021 afetou também o setor de combustíveis, pois prejudicou a safra de cana-de-açúcar e, conseqüentemente, a produção de etanol em Minas Gerais (FAEMG/SENAR-MG, 2022). Como agravante, um estudo recente concluiu que todos os biomas brasileiros estão perdendo água nas últimas décadas. O cerrado, bioma muito presente no estado, apresentou uma redução de 53,4% dos corpos de água naturais entre 1985 e 2023 (MAPBIOMAS, 2023).

Outra vulnerabilidade agravada no estado é a transmissão de eletricidade, dado que, além da pressão climática sobre as infraestruturas, uma parte do sistema pode estar pressionado pela grande expansão recente da geração solar. Com gargalos sistêmicos e risco de restrições de escoamento da geração (ONS, 2023), algumas soluções estão sendo implementadas no estado, como os recentes leilões de transmissão destinados a reforçar as regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (MME, 2024b). Adicionalmente, em seu plano de investimentos para o período de 2025 a 2029, a Cemig anunciou que destinará mais de R\$ 27 bilhões nos sistemas de distribuição e transmissão de Minas, o que permitirá, com a modernização e



aprimoramento dos sistemas, uma maior conexão de geração distribuída e, também, maior resiliência da rede (CEMIG, 2024).

O sistema de transmissão mineiro, vale destacar, é crucial para o funcionamento do Sistema Interligado Nacional (SIN), visto que interliga Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia, servindo, ainda, de escoamento da energia excedente do subsistema Nordeste.

Identificados esses desafios estruturantes, os próximos tópicos apresentam um conjunto de ações centrais para a descarbonização do setor energético no estado, abrangendo principalmente a oferta renovável de eletricidade e combustíveis.

Geração de eletricidade

Com a crescente tendência de eletrificação de setores como indústria e transporte, o consumo de energia elétrica de Minas Gerais é projetado para crescer nas próximas décadas. De acordo com a Estratégia de Transição Energética de Minas Gerais (FEAM, 2021), mesmo em um cenário sem políticas adicionais favorecendo a transição, o consumo de eletricidade aumentaria em 50% até 2030 e mais que dobraria em 2050, em comparação com os níveis de 2020. Considerando um cenário de transição avançada, com incentivos diversos, a demanda de eletricidade em Minas Gerais pode crescer 4,6 vezes até 2050. Para suprir essa demanda, o setor energético do estado, ainda majoritariamente hidrelétrico, deve se diversificar. Apesar de a matriz elétrica de Minas Gerais já ter baixa emissão, o estado ainda possui grande potencial de expansão das fontes renováveis.

Energia eólica

Sem participação significativa na geração do estado, a energia eólica possui potencial teórico estimado da mesma ordem de grandeza do total da geração hidrelétrica. Esse potencial está concentrado, principalmente, na região central do estado, nas serras do Espinhaço e do Cipó. Para turbinas a 100m de altura, o potencial chega a 39,0 GW, que se somam a outros 10,6 GW e 24,7 GW para alturas de 50 e 75 metros, respectivamente (CEMIG, 2010). A energia eólica é menos competitiva no cenário mineiro devido à necessidade de torres mais elevadas para captarem maiores velocidades de vento e à dificuldade de instalação das turbinas em regiões montanhosas. São limitações que podem encarecer o preço final por unidade de eletricidade gerada, justificando sua baixa competitividade.

Energia solar

Diferente da eólica, a energia solar já é amplamente utilizada no estado. De acordo com a ANEEL (2024a), Minas Gerais é o estado com maior participação nacional na geração solar, possuindo 6,3 GW de potência fiscalizada de usinas fotovoltaicas centralizadas. Ainda há



cerca de 4,3 GW de capacidade instalada de micro e minigeração distribuída (ANEEL, 2024b). De acordo com a Secretaria de Desenvolvimento Econômico de MG (SEDE), a capacidade instalada solar em Minas Gerais supera a de mais de 150 países, considerando os empreendimentos centralizados e de geração distribuída (SEDE, 2024a). Minas Gerais ainda possui potencial de expansão, principalmente nas regiões norte e nordeste do estado. Além do potencial físico, Minas Gerais tem se destacado pelos incentivos fiscais para a geração solar, como a isenção de ICMS, que tem catalisado a expansão da fonte no estado (SEDE, 2022). Atualmente, a energia solar ocupa o segundo lugar na matriz mineira, ficando atrás apenas da geração hidrelétrica.

Apesar do potencial, a geração fotovoltaica também possui desafios técnicos, como a intermitência da fonte e a inversão de fluxo. A intermitência é uma possível limitação para a geração solar, que precisaria ser complementada por outras fontes. Sem um sistema de armazenamento, a energia gerada é restrita ao período diurno. Já a inversão é caracterizada pelo envio de energia da unidade consumidora para a rede elétrica, e, caso a potência e a tensão sejam diferentes daquelas da rede, o fluxo reverso pode violar os limites de carregamento dos equipamentos elétricos. Como consequência disso, o fornecimento de energia pode ser interrompido. Atualmente, inversão de fluxo é uma pauta presente nos estudos de reforço do sistema elétrico mineiro (ONS, 2023). E para além de reforços estruturantes nas linhas, uma outra solução também está em tecnologias de armazenamento de energia, como bancos de baterias, que reduziria o fluxo reverso em sistemas.

Hidrelétricas e sazonalidade de geração

Em relação às hidrelétricas, embora seja o quarto estado com maior potência instalada dessa fonte, com 13,5 GW de potência fiscalizada (ANEEL, 2024a), ainda há potencial de expansão de hidroeletricidade em Minas Gerais. Sem considerar restrições sociais ou ambientais, poderiam ser instalados 7.691 MW adicionais, gerando 40.424 GWh por ano. A maior parte desse potencial concentra-se nas bacias dos rios São Francisco, Jequitinhonha e Doce. Porém, fatores restritivos, como indicadores de impacto ambiental, devem ser considerados, o que levaria a uma diminuição de 23% de projetos mobilizáveis e de 60% do potencial. Assim, um potencial adicional de 3.000 a 7.700 MW poderia ser instalado no estado, o que corresponderia a uma energia anual de 15.758 a 40.424 GWh, dependendo do nível de restrições aplicadas (FEAM, 2014).

A energia hidrelétrica é altamente competitiva em Minas Gerais, devido à grande disponibilidade de recursos e ao baixo valor por unidade de energia gerada. No entanto, a alta dependência dessa fonte de geração resulta em um sistema vulnerável à variação do ciclo hidrológico. Como consequência, há ciclos de elevação do custo de eletricidade ao consumidor final, devido à necessidade de ativação da geração termelétrica em todo o país. No contexto estadual, Minas Gerais possui apenas duas usinas alimentadas a combustíveis



fósseis operando para a comercialização de energia (ONS, 2024). A primeira, em Ibitaré, possui potência instalada de 226 MW e funciona a partir da queima de gás natural. A segunda, de 87 MW, está localizada em Juiz de Fora, e funciona de maneira *flex*, com a queima de gás natural e etanol (ONS, 2024).

Por estar ligado ao SIN, Minas Gerais usa de maneira indireta a geração fóssil de outros estados. Isso demonstra a importância da diversificação da matriz elétrica, pois as fontes renováveis são intermitentes e, portanto, suscetíveis a variações sazonais. Nesse contexto, a geração eólica pode complementar parcialmente a hidrelétrica, devido à quantidade maior de ventos observada durante o inverno e a primavera, períodos que coincidem com a estiagem no estado (CEMIG, 2010).

No entanto, uma única fonte alternativa não é capaz de dar segurança ao sistema. Dessa forma, outras soluções vêm emergindo ao longo dos últimos anos com potencial para garantir o fornecimento de energia sem riscos de racionamento e aumento expressivo dos custos associados. Entre essas soluções, destacamos nos tópicos a seguir o hidrogênio de baixo carbono e o armazenamento de energia em sistemas de bateria.

Produção de hidrogênio de baixo carbono

O hidrogênio produzido por processos de baixa emissão de carbono é uma alternativa que se destaca em razão de sua versatilidade. Esse combustível pode ser utilizado diretamente como fonte de energia de baixo carbono em setores com alto consumo de energia e como vetor para armazenamento de energia, viabilizando a ampliação de renováveis intermitentes, como a eólica e a solar (EPE, 2021). A Cemig, em um projeto de Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação (PD&I) da ANEEL, estuda metodologias para o planejamento estratégico do hidrogênio verde para o setor elétrico do estado (CEMIG, 2023) e, em novembro de 2024, foi inaugurada a ampliação de uma fábrica de eletrolizadores de hidrogênio verde na cidade de Belo Horizonte (SEDE, 2024b). A fábrica, da empresa alemã Neuman & Esser, começou a ser construída em março de 2023 e é a primeira da América Latina a produzir a tecnologia.

A obtenção do hidrogênio se dá por diferentes insumos e rotas de produção, determinando a sua classificação. O termo hidrogênio de baixo carbono é um conceito guarda-chuva, que abarca diferentes processos de baixa emissão, mas que são diferentes entre si. O hidrogênio verde, por exemplo, é produzido a partir da eletrólise da água utilizando fontes renováveis de energia. Quando oriundo exclusivamente de energia solar, também é conhecido como hidrogênio amarelo. A primeira planta de produção de hidrogênio verde do Brasil, em operação desde 2021 e certificada pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), está localizada junto à usina hidrelétrica de Itumbiara, entre Goiás e Minas. De acordo com a Eletrobras, responsável pela planta, cerca de 100 kg de H₂ podem ser produzidos por dia,



usando energia proveniente da hidrelétrica e, também, da planta fotovoltaica instalada no local (ELETROBRAS, 2023).

Já os processos que obtêm hidrogênio por reforma⁹ de combustíveis, mesmo que renováveis (como o etanol), podem não ser classificados como hidrogênio verde. Para evitar essas controvérsias de nomenclatura, a IEA, por exemplo, prefere os termos hidrogênio renovável ou hidrogênio de baixo carbono, não aderindo a classificação por cores (Incer-Valverde *et al*, 2023).

Além das diferentes formas de obtenção, o hidrogênio pode ser estocado e transportado por longos períodos e distâncias, sem perder a qualidade durante a distribuição. Do ponto de vista econômico, o hidrogênio de baixo carbono ainda necessita de incentivos fiscais e mais P&D para se tornar competitivo em relação a outros tipos de produção de hidrogênio e de combustíveis. Sob essa ótica, o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono (lei n. 14.948/2024) representa um avanço significativo para o mercado do hidrogênio, pois dá diretrizes nacionais e orienta o programa de desenvolvimento energético no país. Além disso, o marco legal aborda incentivos para essa nova indústria, estabelecendo bases para o seu desenvolvimento competitivo em escala nacional (BRASIL, 2024b). No entanto, a ampliação da produção e do uso de hidrogênio de baixo carbono ainda exige subsídios financeiros por meio de incentivos fiscais e investimentos em P&D. Com isso, espera-se reduzir o custo da tecnologia e aumentar o grau de desenvolvimento e a inovação do hidrogênio em suas aplicações.

Em 2024, Minas Gerais sancionou a lei n° 24.940, instituindo a Política Estadual do Hidrogênio de Baixo Carbono e do Hidrogênio Verde. A iniciativa visa fortalecer a cadeia produtiva e expandir o uso do hidrogênio em setores como energia, fertilizantes agrícolas e transporte público. Essa política posiciona o estado como referência nacional, ao incluir estudos para ampliar a participação do hidrogênio na matriz energética e criar incentivos fiscais e creditícios para produção e aquisição de equipamentos necessários a sistemas de hidrogênio de baixo carbono (ALMG, 2024).

No mais, o mercado de hidrogênio de baixo carbono exige certificações específicas, favorecendo estados com matrizes de geração renovável, como Minas Gerais. A lei n. 14.948/2024 define hidrogênio de baixo carbono como aquele com emissões iniciais de até 7 kgCO₂e/kgH₂, considerando a análise de ciclo de vida, que mensura emissões em todas as etapas do processo (BRASIL, 2024b). A lei estadual, no entanto, estabeleceu um limite ainda menor de emissões, de 4 kgCO₂e/kgH₂. Nesse sentido, não só a origem do hidrogênio é

⁹ A reforma a vapor é um processo catalítico provocado pela mistura reacional de vapor de água e combustíveis em uma temperatura elevada. O processo de reforma é amplamente conhecido na indústria química, e normalmente utiliza hidrocarbonetos leves como combustível. Entretanto, já existem estudos utilizando outros combustíveis, como etanol e outros biocombustíveis (Silva *et al*, 2016).



avaliada, mas também as emissões associadas às matérias-primas e insumos da cadeia de fornecimento do hidrogênio. Minas Gerais, como um Estado produtor de minérios e insumos, tem potencial de refletir menores emissões analisando todo o ciclo de vida do processo. Esse potencial se estende acerca de outros processos renováveis do hidrogênio além da eletrólise, como a produção pela reforma de biocombustíveis.

Embora barreiras regulatórias e o aumento da demanda possam limitar o acesso ao hidrogênio de baixo carbono, ele é uma solução promissora para setores de difícil descarbonização, como siderurgia, metalurgia, química e transporte pesado, onde se destaca por sua viabilidade tecnológica e ambiental (IEA, 2024). Para o setor elétrico, dadas as dificuldades técnicas e de demanda do hidrogênio, alternativas para a intermitência das renováveis devem ser estudadas. Entre essas, destaca-se o armazenamento por baterias.

Armazenamento de energia em sistemas de baterias

Há uma grande expectativa quanto ao potencial dos sistemas de armazenamento de energia, especialmente das baterias, em oferecer uma ampla gama de serviços ao setor elétrico, tanto sob a ótica energética quanto socioambiental. A versatilidade desses sistemas, seja em pequena escala para o consumidor final, seja em grandes operadores da geração, distribuição ou transmissão, tem grande potencial para o setor elétrico (EPE, 2019).

Em relação à descarbonização, as baterias possibilitam ampliar a participação de renováveis, mitigando a intermitência dessas fontes e auxiliando a solucionar a inversão de fluxo, fator limitador da energia solar descentralizada. Outro ponto positivo está na flexibilidade de localidade para instalação e de diferentes opções de serviços disponíveis (compactos, larga escala), reduzindo os impactos ambientais locais de implantação desses sistemas (EPE, 2019).

No Brasil, há um único sistema de baterias em larga escala em operação, projeto da ISA CTEEP na subestação de Registro – São Paulo. Ligados em novembro de 2022, os sistemas de baterias têm 30 MW de potência, e são conectados ao sistema de transmissão brasileiro. São pouco mais de 180 *racks* de baterias que ocupam uma área de aproximadamente 5 mil m² (metade de um campo de futebol) com um sistema capaz de entregar energia de 60 MWh por duas horas (ISA CTEEP, 2023). Para referência, essa energia equivale ao consumo de 140 mil residências brasileiras durante duas horas.

Nesse sentido, Minas Gerais também sinaliza investimentos em projetos de armazenamento de eletricidade à bateria. O estado receberá da empresa UCB, entre 2024 e 2028, um investimento estimado de 380 milhões de reais em soluções de alta tensão por meio de containers de baterias (SEDE, 2024c).



Entretanto, ainda são muitas as barreiras técnicas, econômicas e regulatórias para efetivação desses tipos de sistemas no Brasil. Como exemplos, a regulação específica para contratação, utilização e remuneração da tecnologia tem baixa maturidade. Do ponto de vista comercial e técnico, novos direcionamentos setoriais para as hidrelétricas podem conduzi-las cada vez mais ao atendimento de serviços de armazenamento de energia, o que seria uma competição forte à tecnologia inicial das baterias de alta tensão no SIN. Também é incerto em qual elo da cadeia do setor elétrico o serviço específico do “armazenador de energia” poderia se enquadrar, visto que hoje a divisão básica é entre gerador, transmissor e distribuidor. Essa definição pode refletir em novas abordagens de precificação e remuneração do setor.

Do lado fiscal, a carga tributária sobre os sistemas de armazenamento é alta se comparada às demais tecnologias de geração, transmissão e distribuição de energia já presentes no sistema brasileiro. O total de tributos pode chegar a 80% do preço final dos sistemas, e, em Minas Gerais, ainda não há linhas de crédito aplicáveis a essa tecnologia. Além disso, devido à falta de domínio tecnológico do mercado nacional, as baterias são importadas e, portanto, sujeitas à tributação de forma individualizada (Absolar, 2021).

Por fim, há desafios ambientais e técnicos relacionados à segurança em toda cadeia produtiva e à destinação ambientalmente adequada das baterias inservíveis, o que requer um robusto processo de armazenamento, transporte, operação e disposição final adequadas, minimizando impactos e riscos de acidentes e contaminações (EPE, 2019).

Biocombustíveis

Minas Gerais produz biocombustíveis para fins diversos, destacando o biodiesel e o etanol. Em relação ao primeiro, o estado possui uma planta de biodiesel localizada em Montes Claros. A capacidade de produção é de 545 m³/dia e o combustível é produzido, principalmente, a partir de óleos da soja, mas outros vegetais também são usados em menor quantidade, como pinhão-manso, algodão, girassol e mamona.

A principal ação de mitigação para a produção do biodiesel consiste na substituição de combustíveis fósseis utilizados no processo e na aquisição de eletricidade pelo uso direto de resíduos agroflorestais em sistemas de cogeração (COPPE-UFRJ/UFMG/USP, 2022). Considerando a projeção de aumento de consumo do biodiesel devido ao crescimento da demanda e à evolução da legislação, a capacidade nominal do estado deveria aumentar em quase 8 vezes para suprir a demanda de 1,5 milhão de m³ em 2030 (FEAM, 2014).

No estado, o etanol é produzido em 35 usinas, localizadas principalmente no Triângulo Mineiro (ANP, 2024). Todas as usinas utilizam a cana-de-açúcar como matéria-prima, sendo responsáveis por 43% da produção estadual desse insumo. Todas as usinas são autossuficientes em energia, pois utilizam o bagaço em sistema de cogeração. No entanto,



isso não significa que o processo esteja totalmente otimizado. Inclusive, o PD propõe melhorias na eficiência do processo e na redução do consumo energético na produção de etanol, com o objetivo de diminuir ainda mais as emissões associadas.

A implementação de tecnologias de captura de carbono na produção de biocombustíveis é reconhecida no PD e no PLAC-MG como central para o estado atingir a neutralidade climática. Em 2050, essa captura seria responsável por anular as emissões de Minas Gerais, com um valor negativo de 64,05 milhões de toneladas de CO₂e, de acordo com o PLAC.

O potencial teórico é possível, já que a captura de carbono em plantas de biocombustível, o chamado BIO-CCS (Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono), apresenta ciclo de vida negativo de emissões, sendo uma valiosa tecnologia para a descarbonização global (CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ, 2024). Não é certo, no entanto, que haverá demanda suficiente por esses combustíveis no estado. Mesmo com a adoção deles em quase todos os setores dos planos analisados, o aumento da demanda para a garantia dos níveis negativos previstos depende de uma série de ações setoriais ainda pouco tangíveis, como a expansão não detalhada do uso de biocombustíveis nos transportes e na indústria. Além disso, como já mencionado, as tecnologias de CCS ainda carecem de maturidade, e sua aplicação efetiva e modelo de negócio ainda estão em desenvolvimento.

A transição para um futuro de baixo carbono em Minas Gerais envolve não apenas o aumento da produção de energia renovável, biocombustíveis e alternativas sustentáveis, mas também a adaptação de refinarias existentes. Nesse contexto, o próximo tópico aborda a expansão da REGAP e os desafios na descarbonização do refino em Minas Gerais.

REGAP e o caminho para o Net Zero

A REGAP, pertencente à Petrobras, é a única refinaria no estado de Minas Gerais e possui capacidade para processar 157 mil barris de petróleo por dia, o que representa 7% da capacidade instalada do setor de refino no Brasil. A refinaria recebe petróleo do Terminal de Campos Elísios, no Rio de Janeiro, através de dois oleodutos (Orbel I e Orbel II). Além disso, recebe gás natural por dois dutos, Gasbel I e II, também proveniente do Rio de Janeiro (PETROBRAS, 2024; COPPE, 2022).

Os principais produtos da REGAP são diesel (com mais de 48% da produção), gasolina, combustível marítimo, querosene de aviação (QAv), gás liquefeito de petróleo (GLP), asfalto, coque verde de petróleo, óleos combustíveis, enxofre e resíduo aromático. Essa produção atende o mercado mineiro e, eventualmente, o Espírito Santo e Brasília (PETROBRAS, 2024). Em 2023, a Petrobras anunciou que, até 2027, a refinaria receberá R\$ 13,1 bilhões (US\$ 2,3 bi) para aumentar a capacidade de produção para 240 mil barris por dia. Esse aumento será feito a partir de melhorias internas na refinaria (EM, 2023).



O PD do estado, no entanto, não considera a expansão da operação da REGAP. Para se manter em operação em um cenário *net zero*, a refinaria teria que reduzir o fator de utilização (FUT) para 70% em 2050 (em 2020, o FUT foi de aproximadamente 78%), considerando a mesma capacidade instalada em 2022. Para incorporar esse aumento indicado pela Petrobras, seria necessária uma atualização dos estudos de descarbonização do estado.

Dentro do cenário *net zero* do PD, além da redução do FUT, a refinaria também substituiria o combustível líquido por gasoso para reduzir as emissões de CO₂ na operação da planta. Em 2023, no entanto, a Petrobras anunciou que instalará uma usina solar na refinaria com capacidade de 11 MWp, o que garantiria o fornecimento de 80% da necessidade elétrica da planta (EIXOS, 2024). Essa iniciativa também deve ser incorporada em atualizações de cenários de descarbonização do estado, pois diminuirá o uso energético de combustíveis fósseis na operação da refinaria.

Outras medidas listadas no PD incluem o aumento da eficiência das unidades de refino, a substituição do gás natural por biometano e a instalação de unidades de captura de carbono (CCS). As tecnologias CCS ainda não são obrigatórias nas refinarias e há desafios em relação ao armazenamento e transporte do gás, uma vez que o mercado para o consumo de CO₂ capturado ainda é limitado (COPPE-UFRJ/UFMG/USP, 2022).

No Brasil, devido às grandes distâncias territoriais, a implementação da complexa infraestrutura para transporte e armazenamento pode levar até cinco anos para ser concluída (BUDINIS et al., 2018). Ainda assim, a medida é incluída no Plano de Descarbonização e resultaria em uma redução de 1,87 para 1,35 MtCO₂e nas unidades de geração de hidrogênio (UGH) e de craqueamento catalítico fluidizado (*fluid catalytic tracking*, FCC) na refinaria. A REGAP já apresentou seis compromissos para mitigar as emissões de GEE provenientes do refino, cuja descrição é feita na

Tabela 2.



Tabela 2: Metas de refino de petróleo em Minas Gerais

Ações de Mitigação	Ano Base	Prazo
Redução das emissões absolutas operacionais totais em 30%	2015	2030
Zero queima de rotina em <i>flare</i>	-	2030
Reinjeção de 80 milhões de tCO ₂ em projetos de CCUS	-	2025
Intensidade de GEE no segmento E&P de 15kgCO ₂ e/boeCC	-	2030
Intensidade de GEE no segmento de refino de 30 kgCO ₂ e/CWT	-	2030
Consolidação da redução de 55% na intensidade de emissões de metano no segmento <i>upstream</i> , atingindo 0.29 tCH ₄ /mil THC	2015	2025

Fonte: Elaboração própria com base em Minas Gerais (2023)



CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS

A metodologia utilizada para classificar as tecnologias de redução de emissões de GEE do setor de energia 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. 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 identificado compreender 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 6, 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 6: Critérios de classificação das tecnologias

Potencial de redução de emissões		
1: Baixo Categoria com emissões pouco significativas e/ou tecnologias que levarão a pequena redução de emissões	2: Médio Categoria com emissões significativas e/ou tecnologias que levarão a redução significativa de emissões	3: Alto Categoria com emissões muito significativas e/ou tecnologias que levarão a grande redução de emissões
Barreiras tecnológicas		
1: Alta Projetos de P&D; Baixa maturidade tecnológica para implementação	2: Média Tecnologias adotadas por players internacionais ou em caráter experimental por players nacionais; Média maturidade tecnológica para implementação	3: Baixa Tecnologias implementadas por players nacionais; Alta maturidade tecnológica para implementação
Barreiras econômicas		
1: Alta Tecnologias demandam altos investimentos públicos e privados	2: Média Tecnologias demandam investimentos públicos ou privados	3: Baixa Tecnologias demandam baixo investimento público ou privado
Alinhamento às políticas climáticas		
1: Baixo Tecnologia ausente das duas políticas (nacional e estadual)	2: Médio Tecnologia alinhada a somente uma das políticas (nacional ou estadual)	3: Alto 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
Geração de energia elétrica					
Expansão da geração eólica	3	3	2	3	54
Expansão da geração solar	3	3	3	3	81
Expansão da geração hidrelétrica	2	3	2	3	36
Uso do hidrogênio para geração elétrica	2	2	1	2	8
Implementação de sistemas de armazenamento de energia em bateria em alta tensão - BESS	2	2	1	2	8
Produção de combustíveis					
REGAP: Aumento da eficiência e redução do fator de utilização (FUT)	2	3	2	3	36
REGAP: Substituição de combustíveis	3	2	2	3	36
REGAP: Captura de carbono - CCUS nas operações	3	1	1	3	9
Instalação de sistemas de cogeração em usinas de biodiesel	2	3	3	3	54
Aumento na eficiência da síntese do etanol	2	2	3	2	24
Implementação de CCUS na produção de biocombustíveis - BIOCCS	3	1	1	2	6

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 7.

Figura 7: Resultado da avaliação dos projetos das tecnologias



Fonte: Elaboração própria

A classificação das tecnologias apresentadas na Tabela 3 e na Figura 7 foram discutidas no workshop de engajamento com os integrantes do Grupo de Trabalho do setor de energia 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 energia 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.

Apesar de Minas Gerais possuir uma matriz elétrica majoritariamente renovável, a geração de eletricidade ainda é uma importante fonte de emissão do setor, o que evidencia o potencial de inserção de novas fontes e tecnologias na matriz para garantir a descarbonização. Além disso, a alta dependência em hidrelétricas faz com que o estado fique vulnerável à variação dos recursos hídricos.

Dessa forma, o estado já vem investindo em alternativas, principalmente na geração solar, e analisando outras soluções para a intermitência das renováveis, como o armazenamento de baterias e a produção de hidrogênio verde. Há, ainda, outras fontes com alto potencial no estado a serem exploradas, com destaque para a geração eólica, ainda inexpressiva em Minas Gerais. Adicionalmente, o uso de biocombustíveis e subsequente captura de carbono possibilitaria o abatimento das emissões remanescentes do estado.

Na seção de classificação das tecnologias, vale ressaltar que, apesar da significativa relevância das soluções classificadas como extensão da fronteira, elas ainda estão em etapas de desenvolvimento ou implementação, com baixa maturidade para aplicação em larga escala. Como discutido nas seções anteriores do diagnóstico, o hidrogênio de baixo carbono para geração elétrica não é competitivo se comparado às demais soluções, pois ainda faltam incentivos fiscais e mais P&D para sua implementação. Além disso, em estudo publicado em agosto de 2024, cientistas de Harvard concluíram que os custos de distribuição e armazenamento do combustível continuarão altos no futuro, e, portanto, mesmo com o barateamento da produção, não haverá uma queda acentuada no preço do hidrogênio (BLOOMBERG, 2024).

Assim como o hidrogênio, o armazenamento em baterias de alta tensão também foi classificado na extensão da fronteira. Isso se justifica pela importante limitação da aplicação dessa tecnologia no Brasil, onde, até hoje, só existe um único sistema do tipo em larga escala. Dessa forma, a tecnologia ainda é menos competitiva no setor. A baixa maturidade tecnológica também é o motivo de soluções de captura de carbono estarem no limite da fronteira, pois a utilização desses sistemas ainda não é obrigatória e o mercado para o CO₂ capturado ainda é limitado no país.



Por fim, como foram analisadas várias barreiras ao desenvolvimento dos projetos previstos, é importante pontuar um obstáculo adicional: a escassez de mão de obra especializada. Como a transição energética requer estudos técnicos e financeiros detalhados, é necessária uma equipe técnica especializada, algo nem sempre acessível para empresas de menor porte. A IEA (2022) projeta uma deficiência crescente de profissionais qualificados no setor de energia, o que pode frear a adoção dessas tecnologias no Brasil.

Próximos passos

Os pontos destacados neste diagnóstico evidenciam os avanços e os desafios tecnológicos e financeiros associados à descarbonização do setor de energia 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 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 energia será a de elaboração dos cenários de descarbonização, que tem como atividades principais:

- Análise e consolidação das metas;
- Avaliação das rotas tecnológicas e estimativa 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, o foco são 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 projetos de descarbonização para o setor;
- Validação do portfólio proposto de projetos de descarbonização com atores-chave;
- Estimativa de investimentos necessários;
- Construção de portfólio de investimentos;
- Identificação de fontes de investimento.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Estudo de inserção de Tecnologia de armazenamento SIN. 2021. Disponível em: https://mcusercontent.com/cc1f6a28297fa160b30bed073/files/0c9417d1-d927-f344-4d78-ab2c8a689ce4/Relat%C3%B3rio_Executivo_Estudo_de_Armazenamento.pdf. Acesso em: 20 de jan. 2025.

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

ALMG; ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE 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

ANA, Agência Nacional das Águas. Dados de operação dos reservatórios SIN. 2024. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin?dropDownListEstados=14&dropDownListReservatorios=19017&dataInicial=01%2F07%2F2021&dataFinal=01%2F10%2F2021&button=Buscar>. Acesso em 01 dez. 2024.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. SIGA - Sistema de Informação de Geração da ANEEL: Quantidade de empreendimentos de geração de energia em operação, 2024a. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/6d90b77c-c5f5-4d81-bdec-7bc619494bb9/resource/11ec447d-698d-4ab8-977f-b424d5deeee6a/download/siga-empresendimentos-geracao.csv>. Acesso em 27 fev. 2025.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Geração Distribuída, 2024b. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJmJmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4M0U2NTkxliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYtctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em 27 fev. 2025.

ANFAVEA, ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2020. 2020. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/anuario2020/anuario.pdf>. Acesso em: outubro, 2024.

ANP. Mapa dinâmico produtores de etanol. 2024. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJmJmRhZWU2NDUtZWE2Yi00NzI5LWJjMGQtNjIwNjE0MjM0MjEzliwidCI6IjQ0OTImNGZmLTl0YTtNGI0Mi0iN2VmlTEyNGFmY2FkYzkyMyJ9>. Acesso em: 29 nov. 2024

BLOOMBERG. Green hydrogen will be far costlier than estimated, Harvard scientists find, 2024. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-10-08/harvard-study-green-hydrogen-will-be-far-costlier-than->



estimated?utm_source=cbnewsletter&utm_medium=email&utm_term=2024-10-10&utm_campaign=Daily+Briefing+09+10+2024. Acesso em 10 out. 2024.

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. Acesso em: 21 jan. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Brasília, 28 maio 2012. Disponível em: http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/lei%2012.651-2012?OpenDocument. Acesso em: 15 jan. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.948, de 25 de setembro de 2024. Dispõe sobre o marco legal do hidrogênio de baixa emissão. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 26 set. 2024. (2024b) Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm. Acesso em: 26 set. 2024.

Budinis, S., Krevor, S., Dowell, N. mac, Brandon, N., & Hawkes, A. (2018). An assessment of CCS costs, barriers and potential. *Energy Strategy Reviews*, 22(August), 61–81. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.003>

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. Cemig alerta para a possibilidade de baixos níveis de armazenamento nos reservatórios das usinas de Emborcação e Nova Ponte, localizadas no Triângulo Mineiro. 2021. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/noticia/cemig-alerta-para-a-possibilidade-de-baixos-armazenamentos-nos-reservatorios-das-usinas-de-emborcacao-e-nova-ponte/>.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. Fato relevante: Cemig informa plano de investimentos para 2025/2029, 2024. Disponível em: <https://ri.cemig.com.br/docs/Fato-Relevante-cemig-2024-12-12-B8zk66Jk.pdf>. Acesso em 16 jan. 2025.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. Atlas Eólico de Minas Gerais, 2010. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2021/03/atlas-eolico-mg.pdf>. Acesso em 14 out. 2024.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. Cemig mapeia as possibilidades de produção e uso do hidrogênio verde em Minas Gerais, 2023. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/noticia/possibilidades-e-uso-do-hidrogenio-verde-em-minas/>. Acesso em 11 out.. 2024.

CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ. Estratégia de Descarbonização: Relatório Completo. Rio de Janeiro: Centro Clima/COPPE/UFRJ, 2024. Disponível em: https://centroclima.coppe.ufrj.br/images/documentos/Estratégia_de_Descarbonização_relatório_completo.pdf. Acesso em: 26 set. 2024.



COPPE-UFRJ/UFGM/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.

EIXOS. Petrobras vai instalar usina solar de 11 MW na REGAP, 2023. Disponível em: <https://eixos.com.br/empresas/petrobras-vai-instalar-usina-solar-de-11-mw-na-regap/>. Acesso em 21 out. 2024.

ELETROBRAS. Planta de hidrogênio renovável da Eletrobras em Itumbiara recebe certificação da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 2023. Disponível em: <https://www.furnas.com.br/noticia/103/noticias/3052/planta-de-hidrogenio-renovavel-da-elektrobras-em-itumbiara-re>. Acesso em 16 jan. 2025.

EM, Estado de Minas. Petrobras anuncia investimento de R\$ 13 bilhões na refinaria de Betim, 2023. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2023/10/30/internas_economia,1584416/petrobras-anuncia-investimento-de-r-13-bilhoes-na-refinaria-de-betim.shtml. Acesso em 21 out. 2024.

EPE. Sistemas de Armazenamento em Baterias - Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento. 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-441/EPE-DEE-NT-098_2019_Baterias%20no%20planejamento.pdf. Acesso em: 22 jan. 2025.

EPE. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio, 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_rev01%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_rev01%20(1).pdf). Acesso em: 24 fev. 2025.

EPE. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2023 - BEN. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2025.

EPE. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 - Meio Ambiente e Energia. 2024a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034?TermStoreId=31423334-e3fc-4ff3-9956-0d09b48b681f&TermSetId=81034557-52ee-41fc-8006-ae8f277b1655&TermId=fe993ad4-988a-4f23-9228-a291acfaf375>. Acesso em: 22 jan. 2025.

FAEMG/SENAR-MG. INFORMATIVO MERCADO AGROPECUÁRIO – Abril/2022. 2022. Disponível em: <https://www.sistemafaemg.org.br/Content/uploads/agronegocio-secoes/CcWN1651607828321.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2025.



FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. Potencial de Energias Renováveis, Volume II - Biomassa, resíduos e Hidroeletricidade, 2014. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/EnergiaMudancasClimaticas/Publicacoes2014/pemc_potencial_er_vol_ii_v1.0_15_04_2014.pdf. Acesso em 11 out. 2024.

FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. Estratégia de Transição Energética de Minas Gerais, 2021. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/2021/MUDANCAS_CLIMATICAS/Estrategia_de_Transicao_Energica_Final.pdf. Acesso em 10 out. 2024.

IEA – International Energy Agency. Low-emissions fuels – Hydrogen, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>. Acesso em 07 nov. 2024.

IEA. Skills Development and Inclusivity for Clean Energy Transitions. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/skills-development-and-inclusivity-for-clean-energy-transitions>. Acesso em: 24 fev. 2025.

INCER-VALVERDE, J.; KORAYEM, A.; TSATSARONIS, G., MOROSUK, T. “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. Energy Conversion and Management, V.291. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117294>. Acesso em: 22 jan. 2025.

ISA CTEEP. Relatório de Sustentabilidade. 2023. Disponível em: <https://www.isaenergiabrasil.com.br/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 24 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.

MAPBIOMAS. PANORAMA DA SUPERFÍCIE DE ÁGUA DO BRASIL 1985 – 2023. 2023. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/06/Fact_MapBiomias_Agua_2023_25.06.24.pdf. Acesso em: 22 jan. 2025.

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.

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: http://www.infraestrutura.mg.gov.br/images/documentos/infraestrutura-ferroviaria/01_plano_estrategico_ferroviario/01_pef/Relatorio_PEF_Minis_2021.pdf<https://clima-gerais.meioambiente.mg.gov.br/vulnerabilidade-territorial>. Acesso em: 10 dez. 2024.



MINAS GERAIS. Plano Estadual de Ação Climática de Minas Gerais: Sumário Executivo. 2023. Disponível em: <https://americadosul.iclei.org/wp-content/uploads/sites/78/2023/06/plac-mg-05062023.pdf>. Acesso em: 20 set. 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

MME. Ministério de Minas e Energia. Fontes renováveis responderam por 93,1% da geração de energia elétrica em 2023, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/fontes-renovaveis-responderam-por-93-1-da-geracao-de-energia-eletrica-em-2023#:~:text=Fontes%20renov%C3%A1veis%20responderam%20por%2093,Minist%C3%A9rio%20de%20Minas%20e%20Energia>. Acesso em: 24 fev. 2025.

MME. Novas linhas irão garantir reforços para o sistema elétrico do Sul e Sudeste. 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/novas-linhas-irao-garantir-reforcosp-para-o-sistema-eletrico-do-sul-e-sudeste>. Acesso em: 22 jan. 2025.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). v. 11, 2024. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/>. Acesso em: 17 jan. 2025.

ONS. NT-ONS DPL 0067/2023: DIAGNÓSTICO DA REDE BÁSICA DE FRONTEIRA DAS REGIÕES NORTE E TRIÂNGULO DE MINAS GERAIS. 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/wp-content/uploads/2023/07/aqui.pdf#:~:text=Portanto%2C%20este%20documento%20tem%20o%20objetivo%20de%20apresentar,gera%C3%A7%C3%A3o%20fotovoltaica%20na%20rede%20de%20distribui%C3%A7%C3%A3o%20dessas%20regi%C3%B5es..> Acesso em: 22 jan. 2025.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Histórico da operação: Geração de energia, 2024. Disponível em: https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em 10 dez. 2024.

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. Acesso em: 20 ago. 2024.

PETROBRAS. Refinaria Gabriel Passos (REGAP), 2024. Disponível em: <https://www.petrobras.com.br/quem-somos/refinaria-gabriel-passos>. Acesso em 21 out. 2024.

SEDE, Secretaria de Desenvolvimento Econômico. Minas Gerais prorroga benefício fiscal para energia solar fotovoltaica até 2032. 2022. Disponível em: <https://desenvolvimento.mg.gov.br/inicio/noticias/noticia/2033/minas-gerais-prorroga-beneficio-fiscal-para-energia-solar-fotovoltaica-ate-2032>. Acesso em: 22 jan. 2025.



SEDE, Secretaria de Desenvolvimento Econômico. Minas Gerais atinge 9 GW e supera mais de 150 países em geração de energia solar, 2024a. Disponível em: <https://desenvolvimento.mg.gov.br/inicio/noticias/noticia/2561/minas-gerais-atinge-9-gw-e-supera-mais-de-150-paises-em-geracao-de-energia-solar>. Acesso em 17 out. 2024.

SEDE, Secretaria de Desenvolvimento Econômico. Energia do futuro: Minas Gerais atrai quase R\$ 4 bilhões em investimentos em fontes alternativas, 2024b. Disponível em: [https://desenvolvimento.mg.gov.br/inicio/noticias/noticia/2339/energia-do-futuro:-minas-gerais-atrai-quase-r\\$-4-bilhoes-em-investimentos-em-fontes-alternativas](https://desenvolvimento.mg.gov.br/inicio/noticias/noticia/2339/energia-do-futuro:-minas-gerais-atrai-quase-r$-4-bilhoes-em-investimentos-em-fontes-alternativas). Acesso em 11 out. 2024.

SEDE, Secretaria de Desenvolvimento Econômico. Minas Gerais vai receber investimento de R\$ 380 milhões em soluções de armazenamento e eficiência energética, 2024c. Disponível em: [https://desenvolvimento.mg.gov.br/inicio/noticias/noticia/2408/minas-gerais-vai-receber-investimento-de-r\\$-380-milhoes-em-solucoes-de-armazenamento-e-eficiencia-energetica](https://desenvolvimento.mg.gov.br/inicio/noticias/noticia/2408/minas-gerais-vai-receber-investimento-de-r$-380-milhoes-em-solucoes-de-armazenamento-e-eficiencia-energetica). Acesso em 11 out. 2024

SILVA, C. H. F.; Madureira, A. J. V.; Tôrres, E. S.; Carvalho, A. M. Produção de Hidrogênio Através de Reforma de Etanol. 2016. CTGI. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Produc%CC%A7a%CC%83o-de-Hidroge%CC%82nio-Atrave%CC%81s-de-Reforma-de-Etanol.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2025.

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



Alex Azevedo

alex.azevedo@waycarbon.com

Bruna Araújo

bruna.araujo@waycarbon.com

Laise Mondo

laise.mondo@waycarbon.com

Letícia Gavioli

leticia.gavioli@waycarbon.com

Luana Ribeiro

luana.ribeiro@waycarbon.com

Nathalia Pereira

nathalia.pereira@waycarbon.com

Raul Miranda

raul.miranda@waycarbon.com



INVEST
MINAS

