

RELATÓRIO DE EXECUÇÃO DO OBJETO

P2.3 – NECESSIDADES E OPORTUNIDADES DE INVESTIMENTO – INDÚSTRIA (PARTE 1)

Referência: INVESTMINAS/CT/25/2024

Este relatório compõe o Produto 2.3 – Necessidades e Oportunidades de Investimento – Indústria (Parte 1), conforme previsto na Cláusula 6.a do Contrato INVESTMINAS/CT/25/2024.

O objeto foi executado no período de janeiro a maio de 2025, incluindo revisões e ajustes entre junho e novembro de 2025. O referido produto será integralizado quando disponibilizada sua Parte 2.



**INVEST
MINAS**

VAJCARBON

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

Necessidades e Oportunidades de Investimento – Indústria (Parte 1)



**INVEST
MINAS**

WVCARBON

Sumário

ACRÔNIMOS.....	7
INTRODUÇÃO.....	11
CONTEXTUALIZAÇÃO	12
ABORDAGEM METODOLÓGICA	14
Cenário Base	15
Cenário <i>Net Zero</i>	17
Cenário Rota.....	19
Análise do potencial de mitigação.....	19
Análise financeira e MACC	21
METODOLOGIA APLICADA E RESULTADOS.....	24
Cenário Base	24
Ferro-gusa e aço	26
Cimento e cal.....	29
Demais segmentos industriais	32
Avaliação do Cenário Base.....	35
Cenário <i>Net Zero</i>	36
Plano de Descarbonização de Minas Gerais (PDMG).....	37
DDS (DDP <i>Initiative</i>).....	37
NGFS (GCAM).....	38
SBTi.....	38
Avaliação do Cenário <i>Net Zero</i>	39
Cenário Rota	41
Tecnologias incluídas na MACC	41
Tecnologias não incluídas na MACC.....	45
Premissas e avaliação do Cenário Rota	47
Avaliação dos Cenários Base, <i>Net Zero</i> e Rota.....	60
CONCLUSÃO	62
CENÁRIOS CONSOLIDADOS	64
Cenário Base	64
Metodologia e premissas	64
Resultados.....	64



Cenário Rota	67
Metodologia e premissas	67
Resultados.....	67
Cenário Rota+	72
Metodologia e premissas	72
Resultados.....	75
Emissões evitadas	91
Considerações finais	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ANEXO	101
Fichas técnicas	101
Grupo 1: Eficiência energética	101
Grupo 2: Substituição de combustíveis e uso de fontes alternativas.....	108
Grupo 3: Medidas inovadoras	116



Índice de figuras

Figura 1: Curvas ilustrativas dos Cenários Base, <i>Net Zero</i> e Rota.....	15
Figura 2: Fluxo lógico generalista da metodologia <i>bottom-up</i>	16
Figura 3: Fluxo lógico generalista da metodologia <i>top-down</i>	17
Figura 4: Exemplo de análise visual das emissões mitigadas por tecnologia.....	21
Figura 5: Exemplo de MACC	23
Figura 6: Participação dos segmentos industriais no nível de emissões industriais de Minas Gerais.....	24
Figura 7: Resumo geral da metodologia (bottom-up).....	26
Figura 8: Esquema simplificado do método utilizado para estimativa de emissões no setor de ferro-gusa e aço.....	28
Figura 9: Esquema simplificado do método para estimativa das emissões no setor de cimento	31
Figura 10: Fluxo do balanço de energia útil	32
Figura 11: Esquema simplificado do método para estimar as emissões dos demais segmentos industriais	35
Figura 12: Evolução das emissões de GEE no Cenário Base por segmento industrial	36
Figura 13: Trajetória de emissões nos cenários avaliados, em relação ao ano-base 2023 ..	40
Figura 14: Comparativo Cenário Base versus Cenários <i>Net Zero</i>	41
Figura 15: Resultado da avaliação das tecnologias	42
Figura 16: Resultados da MACC do setor de indústria.....	54
Figura 17: Resultado da avaliação das tecnologias	59
Figura 18: Trajetória de emissões do Cenário Rota e dos cenários avaliados no produto 2.2	60
Figura 19: Emissões por setor – Cenário Base	65
Figura 20: Emissões totais – Cenários Base e Rota	69
Figura 21: Curva MAC – Cenário Rota	70
Figura 22: Emissões por cenário e setor.....	77
Figura 23: Emissões totais por cenário	78
Figura 24: Curva MAC – Cenário Rota+	79
Figura 25: Emissões evitadas: geração de eletricidade renovável e produção de hidrogênio verde	91

Índice de tabelas

Tabela 1: Consumo energético específico da produção de ferro-gusa e aço	26
Tabela 2: Matriz energética para o setor de ferro-gusa e aço.....	27
Tabela 3: Emissões projetadas do setor de ferro-gusa e aço (MtCO ₂ e)	29
Tabela 4: Emissões do setor de cimento em Minas Gerais entre 2020 e 2050 em MtCO ₂ e ..	31
Tabela 5: Emissões da produção de cal em Minas Gerais entre 2020 e 2050 em MtCO ₂ e ..	32



Tabela 6: Emissões projetadas para os demais segmentos industriais em MtCO _{2e}	35
Tabela 7: Cenário PDMG	37
Tabela 8: Cenário DDS	37
Tabela 9: Cenário NGFS	38
Tabela 10: Cenário SBTi	39
Tabela 11: Síntese das premissas e dos resultados da MACC – setor de indústria.....	49
Tabela 12: Comparação das tecnologias – Cenário Rota e Cenário Rota+	81

Índice de quadros

Quadro 1: Características dos Cenários <i>Net Zero</i>	40
--	----



ACRÔNIMOS

AFOLU – Agropecuária, Floresta e Outros Usos da Terra

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários

BAU – *Business as Usual* (Cenário Tendencial)

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

BESS – *Battery Energy Storage Systems* (Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias)

BEU – Balanço de Energia Útil BEV – *Battery Electric Vehicles* (Veículos elétricos a bateria)

BF-BOF – *Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace* (Alto-Forno – Forno Básico a Oxigênio)

BLUES – *Brazilian Land Use and Energy System Model*

CaO – óxido de cálcio

CAPEX – *Capital Expenditure* (Despesas de Capital)

CCS – *Carbon Capture and Storage* (Captura e Armazenamento de Carbono)

CCUS – *Carbon Capture, Utilisation and Storage* (Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono)

CDP – *Carbon Disclosure Project*

CH₄ – metano

CO₂ – dióxido de carbono

CO₂e – dióxido de carbono equivalente

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

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

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

EAF – *Electric Arc Furnace* (forno a arco elétrico)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética



FBN – Fixação Biológica de Nitrogênio

FCC – *Fluid Catalytic Cracing* (Unidade de Craqueamento Catalítico Fluidizado)

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

GEE – Gás de Efeito Estufa

GNV – Gás natural veicular

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

HTGRs – *high-temperature gas-cooled reactors* (reatores de gás de alta temperatura)

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

IABr – Instituto Aço Brasil

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

ILP – Integração Lavoura-Pecuária

ILPF – Integração Lavoura-Pecuária-Floresta

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

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

IPPU – *Industrial Process and Product Use* (Processo Industrial e Uso de Produto)

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

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

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MOE – *Molten Oxide Electrolysis*

N₂O – óxido nitroso

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

NGFS – *Network for Greening the Financial System*

OPEX – *Operational Expenditure* (despesas operacionais)



PDMG – Plano de Descarbonização para o Estado de Minas Gerais

PIB – Produto Interno Bruto

pkm – Passageiro-quilômetro

PLAC-MG – Plano de Ação Climática de Minas Gerais

PMR – *Partnership for Market Readines*

RD-GN – Redução Direta a Gás Natural

RD-H2 – Redução Direta a Hidrogênio

REGAP – Refinaria Gabriel Passos

SAF – *Sustainable Aviation Fuel* (Combustível Sustentável de Aviação)

SBTi – *Science Based Targets initiative*

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

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

SINDIFER – Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais

SMRs – *small modular reactors* (reatores modulares pequenos)

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

TCFD – *Task Force on Climate-Related Financial Disclosures*

TKU – Tonelada-Quilômetro Útil

TUC – Transporte Urbano de Carga

ktep – Quilotonelada Equivalente de Petróleo

UCR – Unidade de Coqueamento Retardado

UDA – Unidade de Destilação Atmosférica

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UGH – Unidade de Geração de Hidrogênio

UHR – Usinas Hidrelétricas Reversíveis



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

USP – Universidade de São Paulo

VPL – Valor Presente Líquido

WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*

WRI – *World Resources Institute*

WWF – *World Wide Fund for Nature* (Fundo Global para a Natureza)



INVEST
MINAS

WAY CARBON

INTRODUÇÃO

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

Seção 1: traz uma breve contextualização do projeto Rota;

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

Seção 3: detalha as premissas e modelagens utilizadas para o cálculo das emissões dos segmentos de ferro-gusa e aço, cimento e cal e demais segmentos industriais¹, no Cenário Base, estruturado em subseções. Em seguida, são detalhadas as abordagens adotadas na construção do Cenário *Net Zero*, também estruturado em subseções. Por fim, o Cenário Rota apresenta uma análise dos custos de implementação e potencial de mitigação para diversas tecnologias para o setor de indústria, incluindo representações gráficas comparativas em relação ao Cenário Base e a outros cenários climáticos analisados;

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

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

ANEXO: fichas das tecnologias.

¹ Categoria que agrega mineração, ferroligas, química e outras indústrias.



CONTEXTUALIZAÇÃO

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

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

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

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

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



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



ABORDAGEM METODOLÓGICA

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

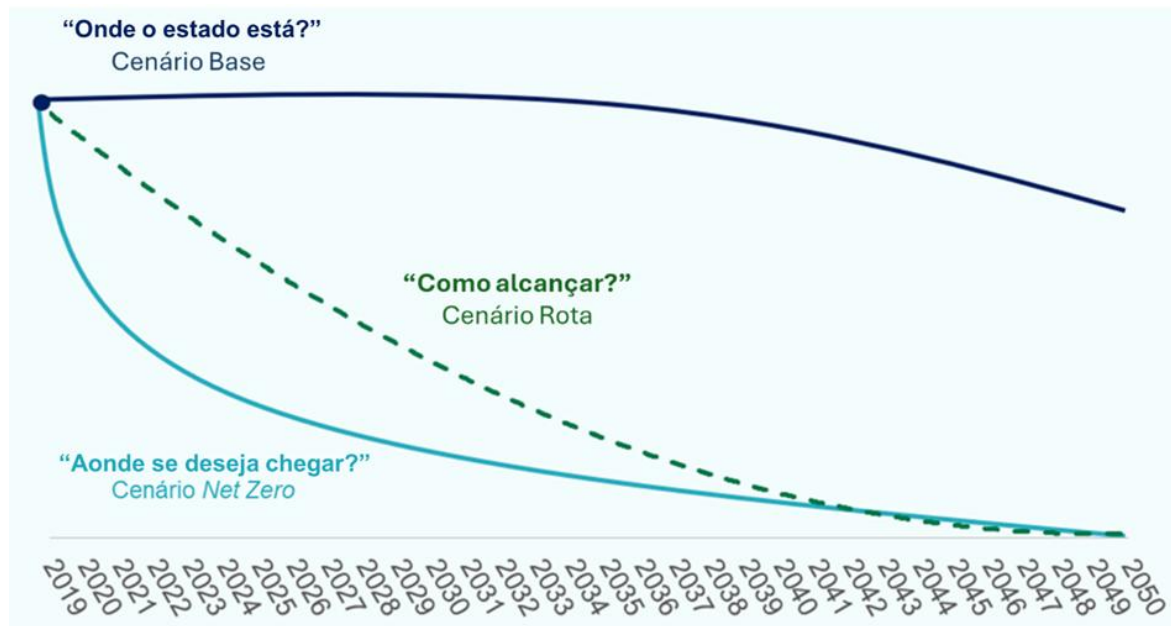
Nesse contexto, os cenários climáticos passam a ter um papel estratégico ao fornecerem base analítica para que organizações possam avaliar não apenas seu impacto sobre as emissões, mas também os efeitos das mudanças climáticas sobre suas operações. Tais cenários evidenciam a necessidade de adoção de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

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

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



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



Fonte: Elaboração própria.

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

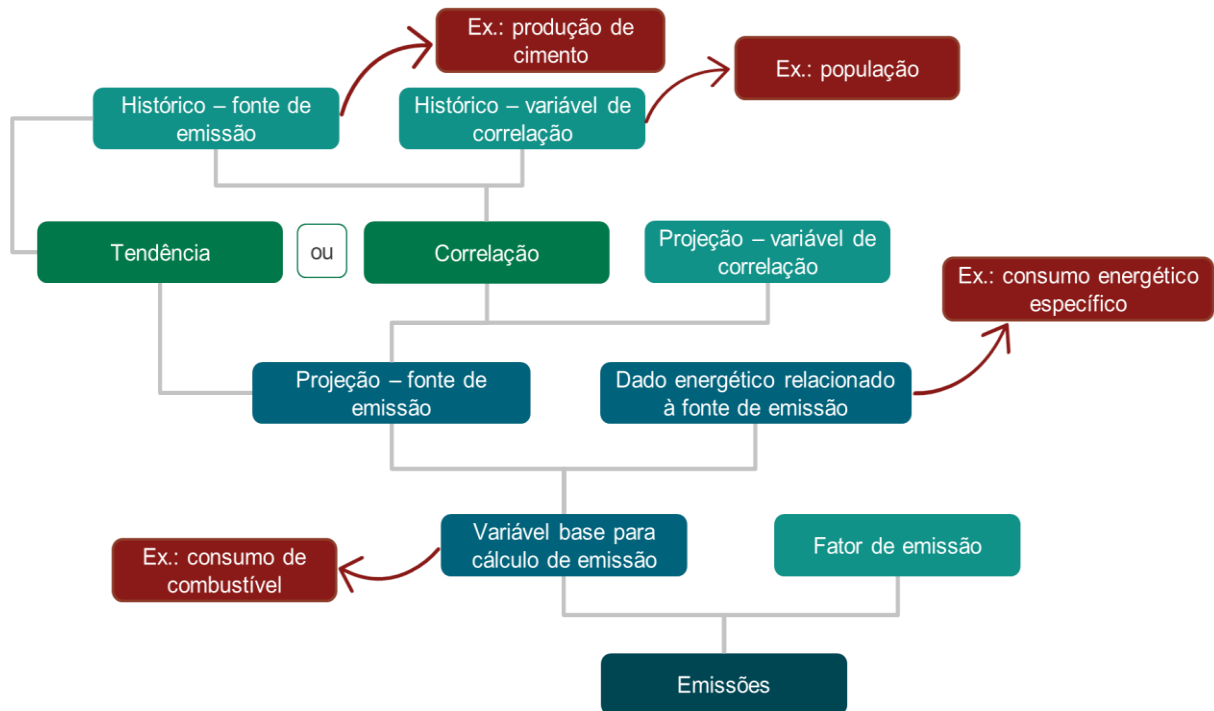
Cenário Base

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

Segundo GRUBB *et al.* (1993), a metodologia *bottom-up* (Figura 2) apresenta um nível de detalhamento maior, partindo das tecnologias vigentes para estimar as emissões. Em vez de considerar apenas certos indicadores (macroeconômicos, demográficos e de outros tipos), essa modelagem se baseia em dados específicos da fonte emissora, como o nível de atividade industrial (ex.: produção de cimento em toneladas, valor da produção da indústria química). A projeção dessa fonte de emissão pode ser feita com base em tendências históricas ou correlações com outras variáveis, como a população. Além disso, incorporam-se dados energéticos associados à fonte, como consumo energético por tonelada produzida, matriz energética e eficiência energética.

Esses dados permitem transformar a fonte emissora em uma variável energética, que, por sua vez, é usada no cálculo das emissões finais, com as emissões geradas pelo processo industrial.

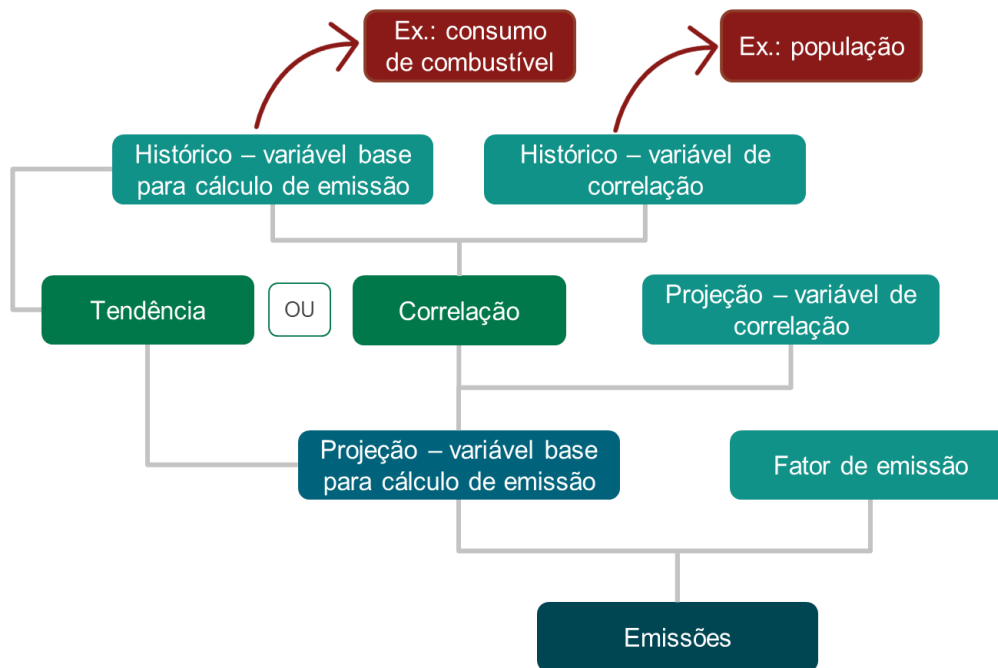


Figura 2: Fluxo lógico generalista da metodologia *bottom-up*

Fonte: Elaboração própria.

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



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

Fonte: Elaboração própria.

No setor de indústria, foi utilizada a metodologia *bottom-up*, que descreve matematicamente o perfil de emissões e consumo energético a partir das tecnologias de cada um dos principais segmentos. Em linhas gerais, as premissas utilizadas foram baseadas no nível de atividade da indústria, na matriz energética e nas principais tecnologias de produção, que serão detalhadas na próxima seção.

Cenário *Net Zero*

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

***Net Zero* do Plano de Descarbonização de Minas Gerais (PDMG)** – esse cenário foi desenvolvido especificamente para atender às necessidades e características do estado de Minas Gerais. No PDMG há uma integração dos modelos econômico e tecnológico por meio da abordagem setorial em que todos os setores contribuem para a redução de emissões de forma otimizada, com diversas tecnologias sendo aplicadas. Isto é, o modelo entrega o cenário com maior custo-efetividade. De forma geral, a redução significativa das emissões é atingida considerando a adoção, principalmente, de medidas de eficiência energética nos diversos segmentos que compõem a indústria, uso de hidrogênio e captura de carbono na siderurgia. No entanto, ainda restarão emissões residuais no setor industrial nesse período, exigindo a implementação de remoções de carbono em outros setores, como o reflorestamento ou a captura de dióxido de carbono (CO₂) associada à bioenergia (BECCS), para alcançar o *Net Zero*.



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

Network for Greening the Financial System (NGFS) – essa metodologia adota uma abordagem setorial e nacional para a redução de emissões, combinando políticas e estratégias econômicas, assim como o DDP. O Cenário *Net Zero 2050* do NGFS é uma abordagem ambiciosa que visa limitar o aquecimento global a 1,5 °C por meio da implementação de políticas climáticas e inovações tecnológicas, alcançando emissões líquidas zero de GEE até 2050. Para atingir essa meta, é fundamental a adoção imediata de políticas climáticas robustas. Adicionalmente, os mecanismos de remoção de carbono² poderão ser usados para acelerar a descarbonização, porém deverão ser mantidos no mínimo possível, pois existem riscos, como a indisponibilidade de tecnologias de captura nos próximos anos, o que torna necessário manter a adoção desses mecanismos amplamente alinhada com a produção de bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS) (NGFS, 2022).

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

- **contração absoluta:** refere-se à aplicação de uma taxa fixa de redução absoluta das emissões totais de gases de efeito estufa, em relação ao ano-base para todas as empresas, independentemente do setor. O percentual de redução definido pela SBTi para metas de longo prazo (2040-2050) é de 90% em relação ao ano-base.

² Os mecanismos destacados pelo NGFS referem-se à remoção tecnológica de carbono (technological carbon removal – TCRs), como a captura e o armazenamento de carbono. O uso dessas tecnologias em níveis reduzidos parte da premissa de que sua adoção indiscriminada poderia desencorajar rotas cruciais de descarbonização, como a transição para matrizes energéticas renováveis. Nesse cenário, a queima de combustíveis fósseis poderia ser mantida nos níveis atuais, com suas emissões sendo compensadas por meio dessas tecnologias, resultando em um balanço líquido de emissões igual a zero. No entanto, o uso de captura e armazenamento de carbono (CCS) é incentivado quando combinado à produção de bioenergia (BECCS), pois envolve a remoção de CO₂ de origem biológica, contribuindo para um balanço negativo de emissões – ou seja, remoções líquidas de carbono da atmosfera.



- **abordagem de descarbonização setorial** (SDA, na sigla em inglês): considera ambições específicas para determinados setores ou subsetores. As metodologias são elaboradas considerando o contexto de cada um e buscando estabelecer metas que sejam ao mesmo tempo alcançáveis e ambiciosas.

Cenário Rota

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

A MACC é uma ferramenta utilizada para avaliar o custo-benefício de diferentes tecnologias ou soluções de descarbonização, a partir do desenvolvimento de trajetórias de emissões setoriais com o levantamento de soluções e construção de diagnóstico do inventário setorial. Esse processo envolve a elaboração de cenários futuros de emissões e o mapeamento das estimativas de redução de emissões e dos custos associados (ANTAQ, 2023). Dessa forma, a ferramenta permite visualizar o custo por tonelada de carbono equivalente evitado e a quantidade de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) que um projeto será capaz de mitigar (WAYCARBON, 2022). As próximas subseções detalham os aspectos ambientais (análise do potencial de mitigação) e econômicos (análise financeira), fundamentais para aplicação da MACC.

Análise do potencial de mitigação

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

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

A construção do Cenário Rota se dá por meio de um processo sequencial ou cumulativo de ajuste anual das emissões projetadas no Cenário Base até 2050. Para cada ano, calcula-se a redução de emissões esperada com a aplicação de cada tecnologia, levando em conta suas taxas de penetração e potenciais individuais, previamente analisados. Essas reduções são então subtraídas das emissões correspondentes do Cenário Base, resultando em uma



trajetória anual de emissões líquidas que define o Cenário Rota. Assim, a diferença de emissões dos dois cenários, em qualquer ponto no tempo, representa o total de mitigação acumulada proporcionado pelas tecnologias implementadas até aquele ano, conforme visualizado na Figura 4.

Para cada uma das tecnologias avaliadas, foram analisados o ano de aplicação, a taxa de implementação ao longo do horizonte temporal e os impactos ambientais (Mitigação de CO₂e) e econômicos (*Capital Expenditure* – CAPEX e *Operational Expenditure* - OPEX) esperados com sua implementação. Além disso, devido à complexidade da análise, conforme a natureza da tecnologia, foram incorporados dados complementares provenientes da literatura.

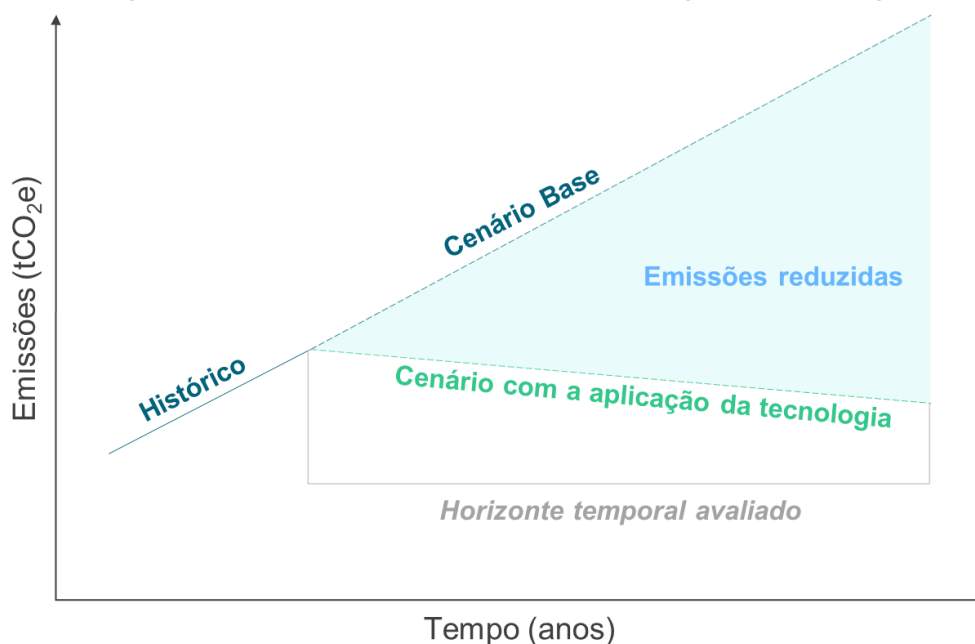
Nesse contexto, para a definição do Cenário Rota, assim como para a elaboração do Cenário Base, que representa a situação BAU, é fundamental identificar padrões históricos entre as fontes de emissão e o crescimento de determinadas variáveis como Produto Interno Bruto (PIB) ou população. Esses padrões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

Sob essa ótica, os dados históricos são importantes para trazer um panorama do setor industrial de Minas Gerais, servindo de base para a projeção de emissões de acordo com a realidade estadual. O nível de atividade industrial, as rotas tecnológicas, o uso de diferentes combustíveis e a eficiência energética são fatores que influenciam as emissões da indústria, indicando a complexidade do desafio enfrentado pelo estado para a descarbonização do setor.

Adicionalmente, as emissões de uma tecnologia são determinadas em função do impacto da alteração dos parâmetros associados a ela, levando em consideração a projeção considerada na atividade da linha de base e nos parâmetros relacionados, como a eficiência energética de diferentes rotas de produção.



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



Fonte: Elaboração própria com base em WBCSD (2023).

Análise financeira e MACC

A integração entre a projeção de emissões e a análise da viabilidade financeira das tecnologias de mitigação representa um grande aliado no estabelecimento de uma estratégia climática. Essa abordagem possibilita visualizar, de modo prático, o custo por tonelada de CO₂e evitado, ou seja, o custo marginal de abatimento decorrente da implementação das referidas tecnologias. Uma solução tecnológica pode apresentar um custo marginal de abatimento negativo, o que significa que sua implementação tem o potencial de gerar algum ganho financeiro, seja por meio de redução de custo, seja por geração de receita adicional. De modo análogo, o custo marginal de abatimento positivo evidencia opções que exigem uma abdicção do ganho financeiro.

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

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

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

Na qual:

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



Redução GEE: potencial de mitigação, expresso em tCO₂e.

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

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

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

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

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

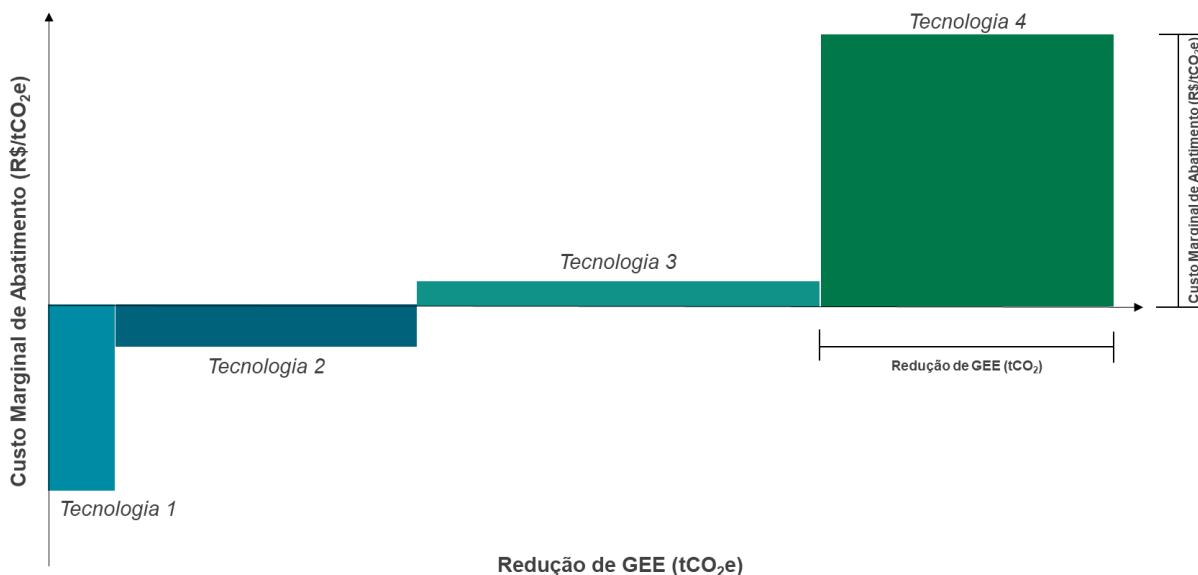
Em resumo, a partir do fluxo de caixa incremental, que consolida as variações anuais de CAPEX e OPEX, se calcula o custo marginal de abatimento da tecnologia, métrica fundamental para avaliar sua relação de custo-efetividade em relação ao Cenário Base.

Assim, como resultado da MACC, o eixo x representa as emissões cumulativas reduzidas em relação ao Cenário Base, no qual as tecnologias propostas não foram implementadas. A largura de cada barra corresponde ao potencial de mitigação de emissões de GEE da tecnologia correspondente – quanto mais larga a barra, maior o potencial de redução. Já o eixo y representa o custo marginal de abatimento de cada tecnologia, sendo a altura da barra proporcional a esse custo, que representa a viabilidade econômica de opções de mitigação.



Dessa forma, barras mais altas indicam custos marginais de abatimento mais elevados (WAYCARBON, 2022). A Figura 5 apresenta, de modo ilustrativo, uma MACC.

Figura 5: Exemplo de MACC



Fonte: Elaboração própria.

A MACC ilustrada na figura anterior organiza diferentes tecnologias de acordo com seu potencial de redução GEE, representado no eixo horizontal (em tCO₂e), e seu custo marginal de abatimento, representado no eixo vertical (em R\$/tCO₂e). O custo marginal de abatimento indica o custo líquido adicional (ou economia líquida) para reduzir uma tonelada de CO₂e ao implementar uma tecnologia específica, em comparação com os custos do Cenário Base, considerando todo o horizonte de tempo da análise.

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

Por outro lado, as tecnologias localizadas acima do eixo x (Tecnologias 3 e 4) têm um custo marginal de abatimento positivo. Isso indica que, ao longo do horizonte temporal, o custo total de implementação e operação dessas tecnologias é superior ao custo da tecnologia do Cenário Base. Embora contribuam para a redução de emissões, essas opções resultam em um custo líquido adicional por tonelada de CO₂e abatido, sem que os benefícios operacionais compensem esse custo dentro do período analisado. Dessa forma, são consideradas menos custo efetivas sob a ótica financeira e podem requerer incentivos ou políticas específicas para viabilizar sua adoção.

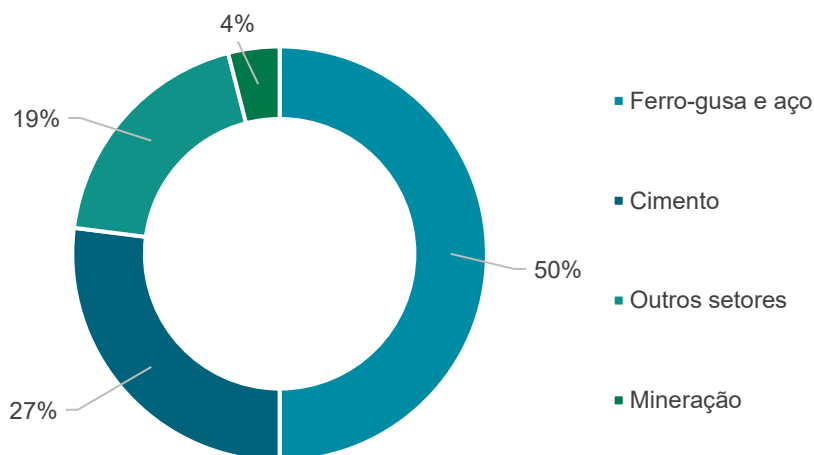


METODOLOGIA APLICADA E RESULTADOS

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

Nesse sentido, é importante trazer um panorama do setor industrial de Minas Gerais, oferecendo uma base sólida para a construção de cenários alinhados à realidade do estado. O setor industrial é composto por uma gama de segmentos, e, em cada um deles, diversos produtos e tecnologias distintas. Entretanto, ao olhar para o perfil de emissões do setor em Minas Gerais (Figura 6: Participação dos segmentos industriais no nível de emissões industriais de Minas Gerais), é importante ressaltar a relevância da indústria de ferro-gusa e aço e da indústria de cimento, pois, juntas, representam cerca de 80% das emissões totais da atividade industrial no estado. Dessa maneira, a descarbonização do setor necessitará de esforços concentrados nesses segmentos para alcançar uma redução significativa das emissões.

Figura 6: Participação dos segmentos industriais no nível de emissões industriais de Minas Gerais



Fonte: Elaboração própria com base em Observatório do Clima (2024).

Cenário Base

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



De modo geral, a modelagem utilizada no PDMG considerou análises setoriais a partir de um processo de *downscaling*, refinando projeções nacionais para o contexto de Minas Gerais. Ainda, integra oferta e demanda para otimizar a relação custo-efetividade das tecnologias de mitigação. Para a construção dos cenários no projeto Rota, conforme destacado na seção anterior, foi desenvolvida uma modelagem matemática³, a fim de caracterizar o perfil das emissões do estado. A abordagem adotada baseia-se na caracterização tecnológica dos segmentos industriais, também conhecida como *bottom-up*.

Nesse método, foi traçado o perfil das principais fontes de emissão em cada um dos principais segmentos do setor. Esse tipo de abordagem é frequentemente usado para elaboração de cenários de descarbonização e está presente em diversos estudos de nível nacional, como o projeto *Partnership for Market Readiness* (PMR) do Banco Mundial com o Ministério da Fazenda, o Plano Nacional de Energia da Empresa de Pesquisa Energética, entre outros. Além disso, é aplicada em pesquisas globais, como DDP (HEBEDA, 2024).

A desagregação da modelagem foi estruturada de forma a considerar os segmentos que são responsáveis pela maior parte das emissões, além da importância na atividade econômica do setor industrial. Dessa forma, a modelagem de cálculo foi elaborada para os segmentos (i) ferro-gusa e aço; (ii) cimento e cal; e (iii) demais segmentos industriais (categoria que agrega mineração, ferroligas, química e outras indústrias).

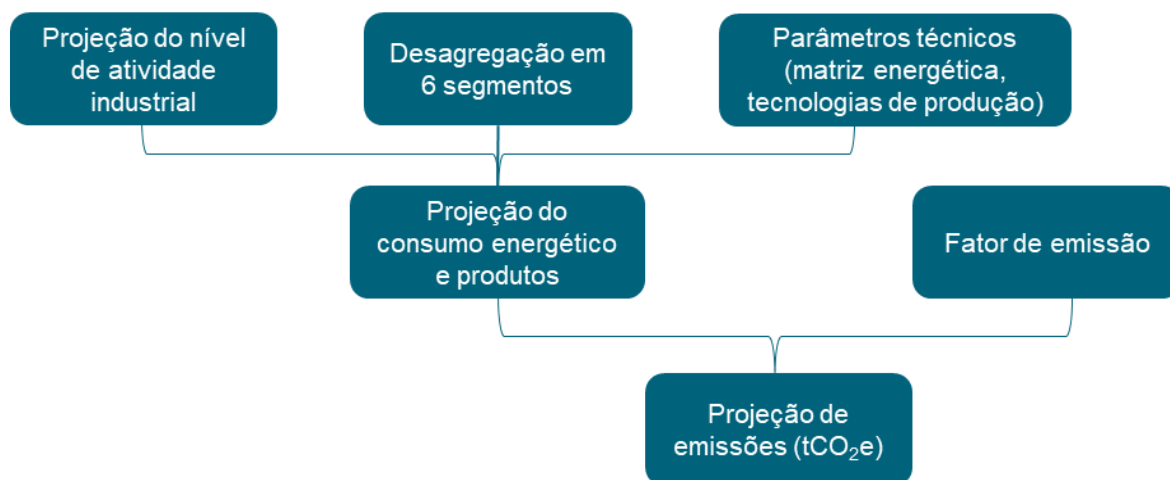
Cada um desses segmentos é caracterizado com base em parâmetros técnicos relevantes para a estimativa de suas emissões, como consumo de energia, eficiência energética, intensidade de emissão de produtos, ou principais rotas tecnológicas. Com essa estrutura definida, os parâmetros são projetados em função do nível de atividade de cada um dos segmentos. Essa atividade pode ser a produção em quantidade (como tonelada de aço) ou o valor adicionado do segmento. Por fim, o consumo de energia e as emissões em seus processos são estimados no horizonte até 2050 e multiplicados por seus respectivos fatores de emissão. Esse processo permite calcular o total das emissões para cada um dos segmentos industriais.

A Figura 7 apresenta um resumo do esquema da modelagem (*bottom-up*) utilizada para a projeção das emissões no setor industrial.

³ A modelagem matemática se refere a uma estrutura algébrica que nos permite relacionar as emissões de GEE a cada uma das atividades estruturais.



Figura 7: Resumo geral da metodologia (bottom-up)



Fonte: Elaboração própria.

Ferro-gusa e aço

No geral, a produção de aço no Brasil pode ser feita por meio de duas tecnologias principais: (i) forno a arco elétrico (EAF, na sigla em inglês); e (ii) as que utilizam aciaria a oxigênio integrada a altos-fornos (BF-BOF, na sigla em inglês). No caso da produção de ferro-gusa, considera-se a produção independente, ou seja, aquela que não está integrada à produção de aço. A caracterização do setor de ferro-gusa e aço será baseada nessas principais tecnologias, que serão modeladas em função do seu consumo de energia.

O principal parâmetro técnico utilizado para caracterizar o setor é o seu consumo energético específico, ou seja, a quantidade de energia necessária para produção de uma tonelada de produto (ferro-gusa ou aço), conforme apresentado na Tabela 1. Os dados utilizados foram obtidos a partir do estudo de PINTO, SZKLO e RATHMANN (2018), que fornece valores para diferentes rotas tecnológicas: a (i) rota integrada com uso de carvão mineral ou (ii) vegetal, a (iii) produção via EAF e a (iv) produção independente de ferro-gusa.

Tabela 1: Consumo energético específico da produção de ferro-gusa e aço

Tecnologia	Consumo energético específico (GJ/t)
BF-BOF a carvão mineral	22,7
BF-BOF a carvão vegetal	20,5
EAF	6,34
Produção independente de ferro-gusa	17,4

Fonte: Elaboração própria com base em Pinto; Szklo; Rathmann (2018).

Além do consumo energético específico, é essencial detalhar o percentual correspondente a cada uma das fontes de energia que compõem a matriz energética (Tabela 2). O produto entre



o percentual de cada fonte e o consumo energético específico indica a quantidade consumida de cada fonte para a geração de uma tonelada de ferro-gusa e aço.

Tabela 2: Matriz energética para o setor de ferro-gusa e aço

Tecnologia	Combustível	Proporção
BF-BOF a carvão mineral	Coque de carvão mineral	59,0%
	Gás de coqueria	14,4%
	Eletricidade	6,2%
	Diesel de petróleo	0,9%
	Gás natural seco	3,1%
	Carvão mineral	16,4%
BF-BOF a carvão vegetal	Carvão vegetal	74,5%
	Eletricidade	11,7%
	Diesel de petróleo	2,1%
	Gás natural seco	1,9%
	Carvão mineral	10,2%
EAF	Eletricidade	49,5%
	Diesel de petróleo	4,7%
	Gás natural seco	45,7%
Produção independente de ferro-gusa	Carvão vegetal	98%
	Eletricidade	2%

Fonte: Elaboração própria com base em Pinto; Szklo e Rathmann (2018).

Devido à falta de informações sobre a proporção de cada rota tecnológica dentro do estado de Minas Gerais, assumiu-se como premissa que o setor tem proporção igual à nacional, cujos dados podem ser obtidos a partir de IABr (2024), que também reporta os níveis de produção nacional e estadual. Já os dados de produção de ferro-gusa a partir de produtores independentes foram obtidos pelo Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (SINDIFER, 2024).

A Figura 8 apresenta um resumo do método utilizado para estimar as projeções das emissões do setor de ferro-gusa e aço. O processo começa com a desagregação da produção nas principais tecnologias do setor, seguido do detalhamento do perfil energético, considerando o consumo energético específico e matriz energética. Esses parâmetros são projetados com base no crescimento do setor ao longo do horizonte temporal definido (projeção da produção). Por fim, as emissões são calculadas multiplicando o consumo energético projetado, para cada uma das fontes da matriz, por seus respectivos fatores de emissão.⁴

⁴ É importante destacar que as emissões da produção de ferro-gusa são classificadas como energia, quando acontece exclusivamente para geração de energia, ou processo, quando é referente à etapa de redução do minério de ferro em ferro-gusa. Os combustíveis utilizados nessa etapa são, majoritariamente, o carvão mineral e o carvão vegetal. Mais detalhes sobre o processo podem ser vistos no Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa (Brasil, 2020).



Figura 8: Esquema simplificado do método utilizado para estimativa de emissões no setor de ferro-gusa e aço



Fonte: Elaboração própria.

Na siderurgia, o carbono é utilizado tanto como fonte de energia quanto como agente redutor do minério de ferro (BRASIL, 2020). Parte desse carbono é incorporada aos produtos, e o restante é emitido como dióxido de carbono. Em linhas gerais, cerca de 75% das emissões de dióxido de carbono ocorrem na produção de ferro-gusa, especificamente durante a etapa de redução do minério. O restante das emissões está associado a atividades como o transporte de matéria-prima e a geração de energia. A redução do óxido de ferro ocorre com o uso de coque ou carvão. De acordo com a metodologia do inventário nacional de emissões, as emissões geradas nessa etapa são consideradas como emissões de processo classificadas como *Industrial Process and Product Use* (IPPU). Já as emissões associadas à queima de combustíveis para geração de energia foram consideradas como emissões energéticas. Para fins de simplificação, assim como no inventário nacional, considerou-se que as emissões provenientes do uso de coque de carvão mineral e de carvão mineral são consideradas emissões de processo. As emissões dos demais combustíveis foram contabilizadas como emissões de energia.

Para se calcular as emissões na indústria de ferro-gusa e aço, primeiro se multiplica o consumo energético específico de cada combustível, em cada rota tecnológica, pela produção correspondente de aço e de ferro-gusa (no caso dos produtores independentes). Os valores resultantes são então multiplicados pelo fator de emissão de cada combustível, descontando-



se o carbono fixado no aço.⁵ As Diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa fornecem informações sobre os fatores de emissão (IPCC, 2006).

Para o cálculo do teor de carbono fixado no aço, foi assumido que 1% do carbono da produção é fixado no aço (BRASIL, 2020). A equação a seguir apresenta a estimativa das emissões.

$$\text{EmissãoGEE}_{\text{ano}} = \sum_i \sum_k \left(\text{CEspecifico}_{n,i} \cdot P_{i,\text{ano}} \cdot \text{FatorEmiss\~{o}}_n \right) - (\text{CC} \cdot P_{i,\text{ano}})$$

Na qual:

- **EmissãoGEE_{ano}** é a emissão total de gases de efeito estufa;
- **CEspecifico_{n,i}** é o consumo específico de energia do combustível *n* na tecnologia *i*;
- **P_{i,ano}** é a produção de aço na tecnologia *i* no ano analisado;
- **FatorEmissãon** é o fator de emissão do combustível *n*; e
- **CC** é o conteúdo de carbono fixado no aço.

A projeção da produção de ferro-gusa e aço no horizonte 2050 foi baseada em dados externos provenientes de estudos de cenários nacionais. Como referência, foram utilizados os dados dos cenários desenvolvidos pelo projeto DDP, que apresentam taxa de crescimento anual para os setores industriais brasileiros (DDP INITIATIVE, 2022). Assumiu-se como premissa que o setor de ferro-gusa e aço de Minas Gerais seguirá um comportamento semelhante ao do cenário nacional.

A Tabela 3 apresenta os resultados em relação à projeção das emissões do setor de ferro-gusa e aço até 2050.

Tabela 3: Emissões projetadas do setor de ferro-gusa e aço (MtCO_{2e})

Fonte	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Total	14,8	15,3	17,0	18,0	18,9	20,0	21,2

Fonte: Elaboração própria.

Cimento e cal

Esta seção apresenta os resultados de cálculo utilizada para os produtos minerais não-metálicos cimento e cal. O primeiro se refere ao processo de fabricação de cimento, material utilizado na construção civil para produção de concreto. Já a cal é um material com diversas aplicações, como (i) na metalurgia, usada para dessulfuração do ferro-gusa, (ii) na produção de papel durante a etapa de branqueamento, (iii) na construção civil, entre outros (BRASIL, 2020). No caso da produção de cimento, apresentam-se tanto as emissões de energia quanto de processo. Já no caso da produção de cal, são apresentadas nesta seção apenas as emissões de processo, uma vez que as emissões de energia estão contabilizadas na

⁵ Parte do carbono das fontes de energia compõe a liga metálica que forma o aço.



subcategoria “outras indústrias”, em “demais segmentos industriais” e, portanto, são apresentadas na próxima seção. A metodologia utilizada para essa modelagem, que consiste basicamente na desagregação do consumo energético em função da matriz energética e da eficiência de cada fonte, também é apresentada na próxima seção.

Produção de cimento

A produção de cimento pode ocorrer por via seca ou úmida,⁶ sendo esta última mais intensiva em energia devido à necessidade de evaporação da umidade presente nas matérias-primas (HEBEDA, 2024). O processo pode ser dividido em três estágios principais: preparação da matéria-prima, fabricação do clínquer e moagem e mistura. O processo se inicia com a extração de calcário e argila, que fornecem o carbonato de cálcio necessário para a produção do cimento. Após a extração, os materiais são moídos até atingir uma granulometria inferior a 10 cm e, em seguida, passam por um processo de pré-homogeneização para garantir uma composição química uniforme. Na etapa de pré-aquecimento, esse material passa por ciclones verticais em que entra em contato com gases de exaustão do forno, elevando sua temperatura para cerca de 900 °C. Posteriormente, ele segue para a etapa de pré-calcinação. A farinha pré-calcinada então entra nos fornos rotativos, que operam a temperaturas próximas de 1.500 °C e transformam esse material em clínquer, o produto intermediário da fabricação do cimento. A etapa de calcinação, em que ocorrem as principais emissões de dióxido de carbono, envolve tanto a queima de combustíveis para geração de calor quanto a decomposição térmica do calcário, resultando na formação de cal (CaO) e na liberação de dióxido de carbono. As emissões de calcinação são classificadas como emissões de processo (IPPU, na sigla em inglês), seguindo o padrão do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (BRASIL, 2020).

Após sair do forno, o clínquer é resfriado e misturado com gesso e outros aditivos para formar o cimento Portland, o mais utilizado no setor. O produto final é então moído finamente em moinhos de bolas, tornando-o um pó cinza, que é homogeneizado e armazenado em silos, pronto para ser distribuído e utilizado na construção civil. Para projetar as emissões do segmento de cimento, foi utilizado o Balanço de Energia Útil (BEU) desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

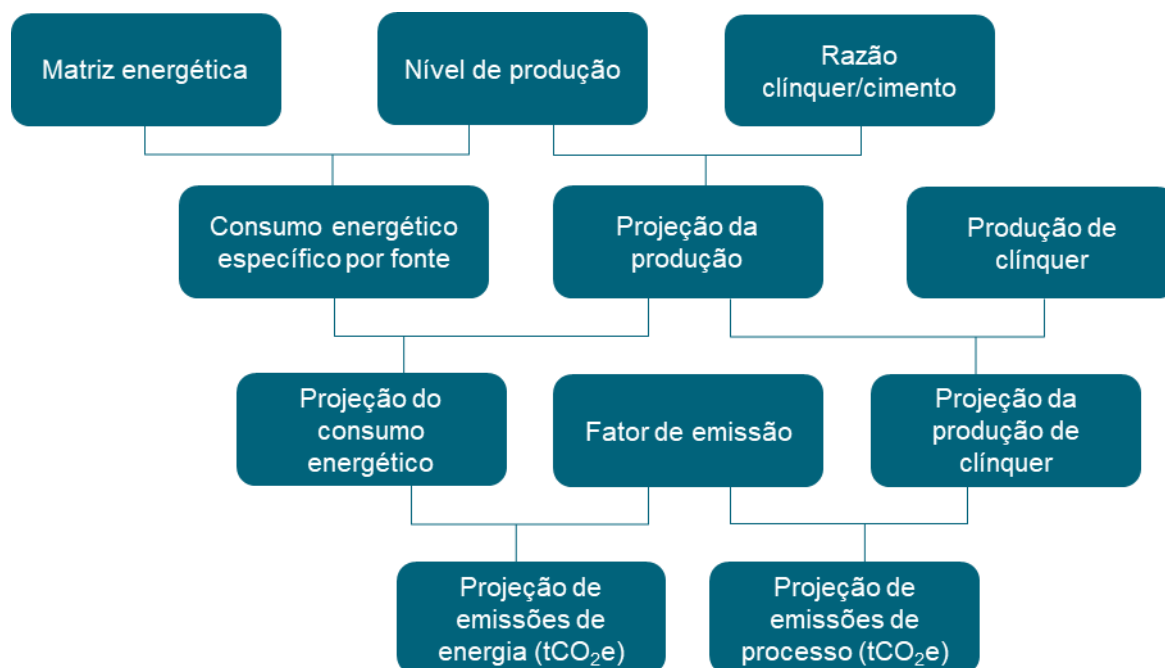
Além das emissões da queima de combustível, a indústria de cimento tem emissões de processo, que ocorrem na etapa de calcinação durante a produção de clínquer (BRASIL, 2020). Para estimá-las, foi utilizado um fator de emissão implícito de 0,536 tCO₂e por tonelada de clínquer, conforme dados do Inventário Nacional (BRASIL, 2020). A quantidade de clínquer produzida foi estimada considerando que o setor apresenta a mesma proporção de adições observada em nível nacional, de acordo com o BRASIL (2020). Essa premissa foi assumida devido à indisponibilidade de informações detalhadas em nível estadual ou municipal.

⁶ A rota úmida não tem produção expressiva no Brasil (BRASIL, 2020).



Assim como nos outros setores, os dados da projeção da produção foram obtidos de fontes externas, a partir de estudos de cenários para o Brasil do projeto DDP (DDP INITIATIVE, 2022). A Figura 9 apresenta um esquema simplificado da metodologia utilizada para o cálculo das emissões da indústria de cimento.

Figura 9: Esquema simplificado do método para estimativa das emissões no setor de cimento



Fonte: Elaboração própria.

O resultado da projeção das emissões do setor de cimento em Minas Gerais entre 2020 e 2050 é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Emissões do setor de cimento em Minas Gerais entre 2020 e 2050 em MtCO₂e

Fonte	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Energia	2,3	2,4	2,7	2,8	3,0	3,2	3,4
Processo	7,4	7,6	8,4	9,0	9,5	10,3	11,1
Total	9,7	10,0	11,1	11,8	12,5	13,5	14,5

Fonte: Elaboração própria.

Produção de cal

A produção de cal emite dióxido de carbono de forma similar aos processos de fabricação de cimento. Sua produção ocorre por meio da calcinação do calcário, processo térmico que decompõe o carbonato, liberando dióxido de carbono. Esta reação é a mesma que ocorre nos fornos de cimento.

As estimativas das emissões desse processo foram calculadas considerando um fator de emissão de 0,73 tCO₂/t de cal produzida, de acordo com dados do Inventário Nacional de



GEE do BRASIL (2020). Os dados de produção de cal foram obtidos pelas bases de dados do Observatório do Clima (2024) e do PDMG (COPPE-UFRJ; UFMG; USP, 2022).

Tabela 5: Emissões da produção de cal em Minas Gerais entre 2020 e 2050 em MtCO_{2e}

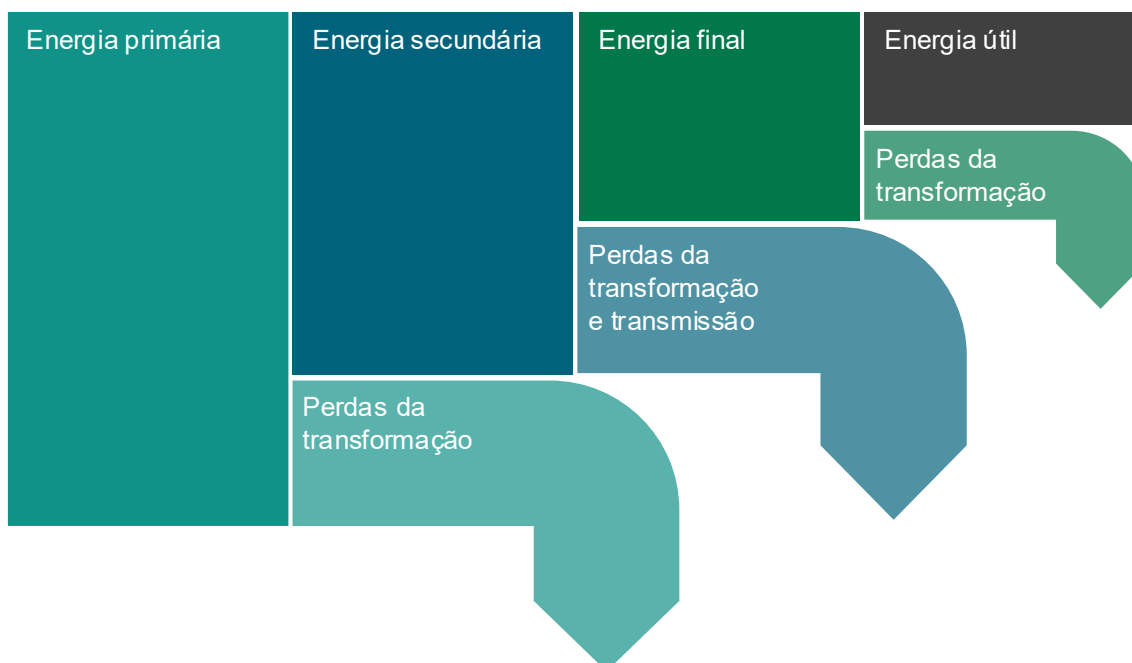
Setor	Fonte	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Cal	Processo	3,51	3,68	4,10	4,33	4,57	4,91	5,26

Fonte: Elaboração própria.

Demais segmentos industriais

A modelagem do consumo de energia dos demais segmentos industriais, juntamente com a do setor de cimento e cal, foi realizada com base no BEU (EPE, 2018b), conforme apresentado na Figura 10. Esse método se baseia no serviço energético, como força motriz ou calor de processo,⁷ prestado como forma de caracterizar o consumo de energia. A escolha dessa abordagem se deve ao fato de que diferentes serviços energéticos e fontes de energia apresentam rendimentos distintos. Por exemplo, uma caldeira a biomassa não apresenta o mesmo rendimento que uma caldeira elétrica. Para evitar distorções, a análise é feita com base na energia útil, ou seja, a quantidade de energia efetivamente aproveitada para realizar o serviço (como a energia térmica utilizada para manter o vapor a 120 °C), em vez da energia final, que corresponde à energia fornecida ao equipamento (como o gás natural consumido pela caldeira).

Figura 10: Fluxo do balanço de energia útil



Fonte: Elaboração própria com base em Hebeda (2024) e EPE (2018b).

⁷ Os serviços energéticos típicos de uma planta industrial são: força motriz, calor de processo, aquecimento direto, refrigeração, iluminação, eletroquímica, entre outros.



O consumo de energia útil para cada combustível é calculado pelo produto entre o consumo final e a eficiência energética do combustível a ser analisado. A energia útil é crucial para a projeção do consumo de energia, pois é ela que informa a real demanda energética necessária para realizar um serviço energético. Esse cálculo é necessário, visto que os combustíveis se diferem em relação à eficiência energética⁸.

$$\text{EnergiaÚtil}_{ij} = \text{ConsumoFinal}_{ij} \cdot \text{Eficiência}_{ij}$$

Na qual:

- **EnergiaÚtil_{ij}** é a energia útil específica do combustível *i* no setor *j*;
- **ConsumoFinal_{ij}** é o consumo final do combustível *i* no setor *j*; e
- **Eficiência_{ij}** é o coeficiente de eficiência do combustível *i* no setor *j*.

Para o consumo de energia final, foram utilizados como referência os dados do Observatório do Clima (2024) e do PDMG (COPPE-UFRJ; UFMG; USP, 2022). Os dados desses trabalhos apresentam informações sobre as fontes de energia nos segmentos industriais analisados, bem como as suas emissões.

Por sua vez, o consumo específico de energia útil é calculado pela relação entre o consumo de energia útil e o nível de atividade do setor, conforme descrito na equação a seguir.

$$\text{ConsumoEspecíficoÚtil}_j = \frac{\sum_i \text{EnergiaÚtil}_{ij}}{\text{NívelAtividade}_j}$$

Na qual:

- **ConsumoEspecíficoÚtil** é o consumo específico de energia útil do setor *i* (e.g. ktep/t de aço);
- $\sum \text{EnergiaÚtil}$ é o somatório do consumo de energia útil dos combustíveis *i* no setor *j* (e.g. ktep); e
- **NívelAtividade** é o nível de atividade do setor *j* (e.g. tonelada de aço produzido, valor da produção).

⁸ Podemos citar como exemplo a comparação entre uma caldeira a gás natural e uma caldeira a biomassa. Em linhas gerais, a caldeira a gás natural possui uma eficiência maior do que caldeiras a biomassa. Ao analisar a substituição de uma caldeira a gás natural por uma de biomassa, é importante considerar a necessidade energética (calor que sai da caldeira). Isto indica que, ao substituí-la, a demanda por biomassa (eficiência menor) deverá ser maior do que a da caldeira a gás natural (eficiência maior).



A partir do consumo específico de energia útil (ex.: ktep/t de aço), é possível estimar as demandas futuras de energia (ou seja, o consumo futuro de energia útil), multiplicando esse indicador pelo nível futuro da atividade do setor (ex.: produção de aço em 2050). Com este consumo de energia útil total (ktep de energia útil) e a matriz energética do setor (ex.: percentual de carvão mineral, gás natural) chegamos à quantidade de energia útil por fonte de combustível. E para chegar na quantidade de energia final basta dividir a energia útil de cada fonte de combustível pela sua respectiva eficiência energética. Por fim, o cálculo das emissões é feito multiplicando-se o consumo final pelo fator de emissão da respectiva fonte – foram utilizados os fatores de emissão para combustão estacionária no setor industrial, apresentados nas diretrizes do IPCC sobre o inventário de GEE (IPCC, 2006).

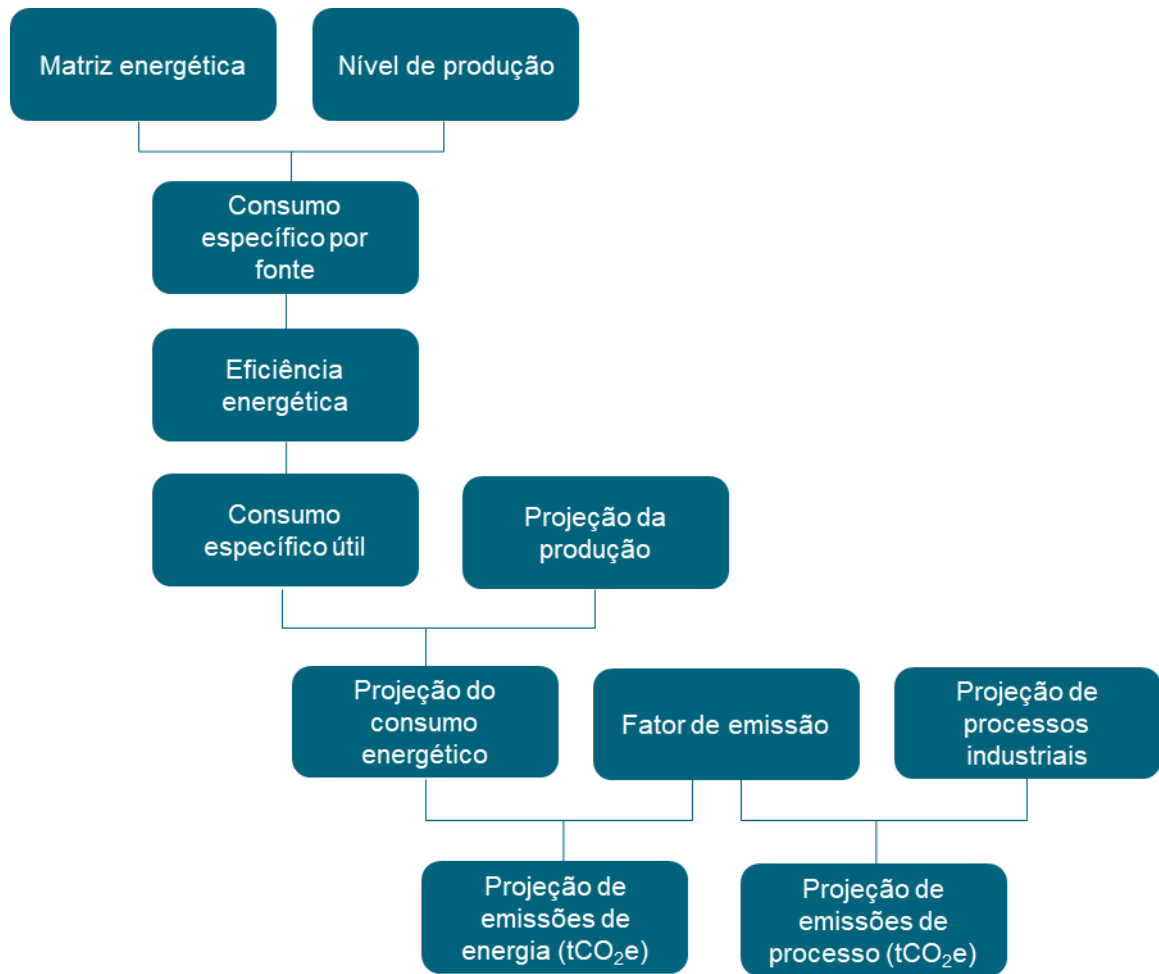
Importante destacar que a indústria de ferroligas também apresenta emissões de processo de forma similar ao setor de ferro-gusa e aço, em que ocorre a redução do minério, formando dióxido de carbono. Da mesma maneira, considerou-se que as emissões provenientes do uso de carvão e coque seriam alocadas como emissão de processo (IPPU), seguindo a metodologia do Inventário Nacional de GEE (BRASIL, 2020).

Assim como nos demais segmentos, a projeção do nível de atividade foi obtida de fonte externa, com base nos cenários publicados no estudo DDP INITIATIVE (2022). Assumiu-se que a taxa de crescimento dos setores industriais em Minas Gerais seguiria o mesmo padrão observado em nível nacional.

Para sintetizar, a Figura 11 apresenta um esquema resumido da metodologia utilizada para projetar o consumo de energia e emissões dos demais segmentos industriais.



Figura 11: Esquema simplificado do método para estimar as emissões dos demais segmentos industriais



Fonte: Elaboração própria.

O resultado das emissões para os demais segmentos industriais é apresentado na

Tabela 6.

Tabela 6: Emissões projetadas para os demais segmentos industriais em MtCO_{2e}

Segmento	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferroligas	0,11	0,11	0,12	0,14	0,14	0,15	0,15
Química	0,47	0,48	0,51	0,54	0,58	0,62	0,65
Mineração	1,2	1,26	1,40	1,47	1,53	1,64	1,74
Outras indústrias	2,83	1,93	2,13	2,23	2,33	2,49	2,64
Total	4,61	3,78	4,16	4,37	4,58	4,89	5,19

Fonte: Elaboração própria.

Avaliação do Cenário Base

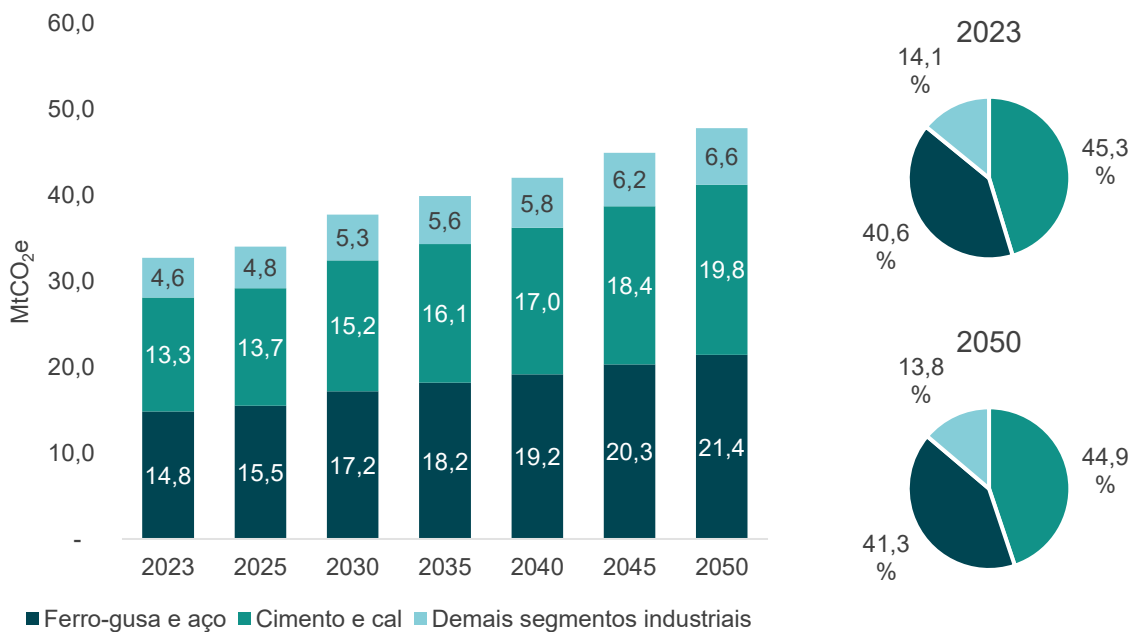
Por fim, as emissões totais do setor industrial no Cenário Base são apresentadas na Figura 12. Com um valor próximo de 32,7 MtCO_{2e} em 2023, as emissões no estado atingem cerca



de 47,8 MtCO₂e em 2050, o que representa um crescimento de 46% no período, fruto do efeito do aumento da atividade na indústria de Minas Gerais.

Entre os segmentos industriais analisados, destaca-se a indústria do cimento e cal, que apresenta o maior crescimento relativo nas emissões. Entre 2023 e 2050, as emissões do setor aumentam em 49%. O setor de ferro-gusa e aço, por sua vez, apresenta aumento de 45% das suas emissões no período, sendo o segundo setor com maior aumento.

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



Fonte: Elaboração própria.

Cenário *Net Zero*

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

- *Net Zero* do PDMG;
- DDS (DDP Initiative);
- *Network for Greening the Financial System* (NGFS);
- Contração Absoluta⁹ do *Science Based Targets initiative* (SBTi).

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



Plano de Descarbonização de Minas Gerais (PDMG)

Para reduzir as emissões, o setor industrial conta, principalmente, com tecnologias de eficiência energética, substituição de combustíveis e o uso de tecnologias como hidrogênio e captura e armazenamento de carbono (CCS, na sigla em inglês). Em linhas gerais, o cenário de mitigação do PDMG, apresentado na Tabela 7, mostra uma redução de emissões pouco expressiva. Isso ocorre porque o setor industrial apresenta altos custos de mitigação e depende de tecnologias que ainda estão em desenvolvimento. Dessa forma, a neutralização das emissões é alcançada mediante remoções em outros setores, como o reflorestamento ou captura de carbono associada à bioenergia (BECCS).

Tabela 7: Cenário PDMG

Ano	Emissões (MtCO _{2e})	Percentual de redução em relação ao ano-base (%) ¹⁰
2023	32,71	
2030	34,11	4,3%
2035	35,67	-9,0%
2040	30,09	8,0%
2045	30,79	-5,9%
2050	32,33	-1,2%

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

DDS (DDP Initiative)

O Cenário de Descarbonização Profunda (DDS, na sigla em inglês) da DDP INITIATIVE (2022) incorpora tecnologias de remoção e captura de carbono nos setores de energia e AFOLU. Em linhas gerais, o setor industrial apresentou um aumento das emissões entre o ano-base 2023 e 2050 (Tabela 8). Esse comportamento pode ser explicado, em parte, pelo aumento do nível de atividade do setor. Outro elemento está relacionado aos custos de mitigação. Devido aos elevados custos das tecnologias de baixo carbono para o setor industrial, a maior parte do esforço para zerar as emissões do país até 2050 vem da agropecuária e do reflorestamento, que garantem a neutralidade no último ano da análise.

Tabela 8: Cenário DDS

Ano	Emissões (MtCO _{2e})	Percentual de redução em relação ao ano-base (%) ¹¹
2023	32,71	-
2030	35,27	-8%
2035	36,09	-10%
2040	36,91	-13%

¹⁰ Reduções negativas indicam aumento das emissões em relação ao ano-base.

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



Ano	Emissões (MtCO _{2e})	Percentual de redução em relação ao ano-base (%) ¹¹
2045	37,32	-14%
2050	37,73	-15%

Fonte: Elaboração própria com base em CENTRO CLIMA, COPPE e UFRJ (2024).

NGFS (GCAM)

Para o projeto Rota, a análise foi baseada em cenários com granularidade nacional, visto que o Brasil se diferencia em diversos fatores dos demais países, especialmente nos setores de energia e transporte, o que decorre da disponibilidade de energias renováveis e dos biocombustíveis no país. O cenário da NGFS¹² extraído do *Global Change Assessment Model* (GCAM) se destaca precisamente pela disponibilidade de informações em nível Brasil.

Nesse contexto, dentre um conjunto de cenários avaliados para construção do cenário apresentado pela NGFS, foi selecionado o cenário “*Emissions|Kyoto Gases|Industry*” na unidade MtCO_{2e}/ano, que representa o cenário *Net Zero* para o setor industrial brasileiro. Desse modo, foram estimadas as emissões do setor a cada 5 anos entre 2023 e 2050. No longo prazo, em 2050, o percentual de redução é de 127% em relação ao ano-base 2023, conforme apresentado na Tabela 9 9. Isso reflete uma descarbonização ambiciosa para o setor.

Tabela 9: Cenário NGFS

Ano	Emissões (MtCO _{2e})	Percentual de redução em relação ao ano-base (%) ¹³
2023	32,71	
2030	21,04	36%
2035	13,73	58%
2040	8,03	75%
2045	3,68	89%
2050	-8,76	127%

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

SBTi

Para o setor de indústria, foi considerado o método de contração absoluta da SBTi, com a ambição 1,5 °C. Esse método divide as metas em curto prazo (que devem ser atingidas entre

¹² A *Network for Greening the Financial System* (NGFS) é uma rede de bancos centrais e supervisores que se voluntaria a compartilhar as melhores práticas para apoiar o setor financeiro no gerenciamento de riscos climáticos e ambientais na transição para uma economia sustentável. A NGFS, em conjunto com especialistas em climatologia e economistas, projetou uma série de cenários hipotéticos que convergem em um ponto de referência comum. Os cenários climáticos foram criados para orientar os formuladores de políticas sobre os riscos das mudanças climáticas e identificar soluções. Desde 2020, a NGFS adota esses modelos visando identificar e compreender os possíveis impactos econômicos e financeiros das mudanças climáticas (NGFS, 2024).

¹³ Reduções negativas indicam aumento das emissões em relação ao ano-base.



5 e 10 anos) e longo prazo (que devem ser atingidas até 2050). A meta de curto prazo exige uma redução linear de 4,2% ao ano entre os anos-base e o ano de atingimento da meta de curto prazo. Já para metas de longo prazo, é necessária uma redução de 90% das emissões em relação ao ano-base.

Nesse contexto, foram utilizadas as emissões calculadas para o estado de Minas Gerais em 2023 (ano-base) e uma redução de 90% em 2050 (ano alvo), conforme representado na Tabela 10.

Tabela 10: Cenário SBTi

Ano	Emissões (MtCO _{2e})	Percentual de redução em relação ao ano-base (%) ¹⁴
2023	32,71	-
2030	23,19	29%
2035	18,24	44%
2040	13,30	59%
2045	8,35	74%
2050	3,41	90%

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

Ressalta-se que, mesmo tendo metas setoriais específicas para os segmentos mais intensivos, como aço e cimento, a SBTi não dispõe de um modelo atualizado que aborde a ambição 1,5 °C para todos os segmentos industriais abordados nesse estudo. Dessa forma, a abordagem utilizada não permite granularidade setorial ou territorial – ou seja, não captura as especificidades do setor industrial brasileiro.

Avaliação do Cenário *Net Zero*

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

¹⁴ Reduções negativas indicam aumento das emissões em relação ao ano-base.



Quadro 1: Características dos Cenários *Net Zero*

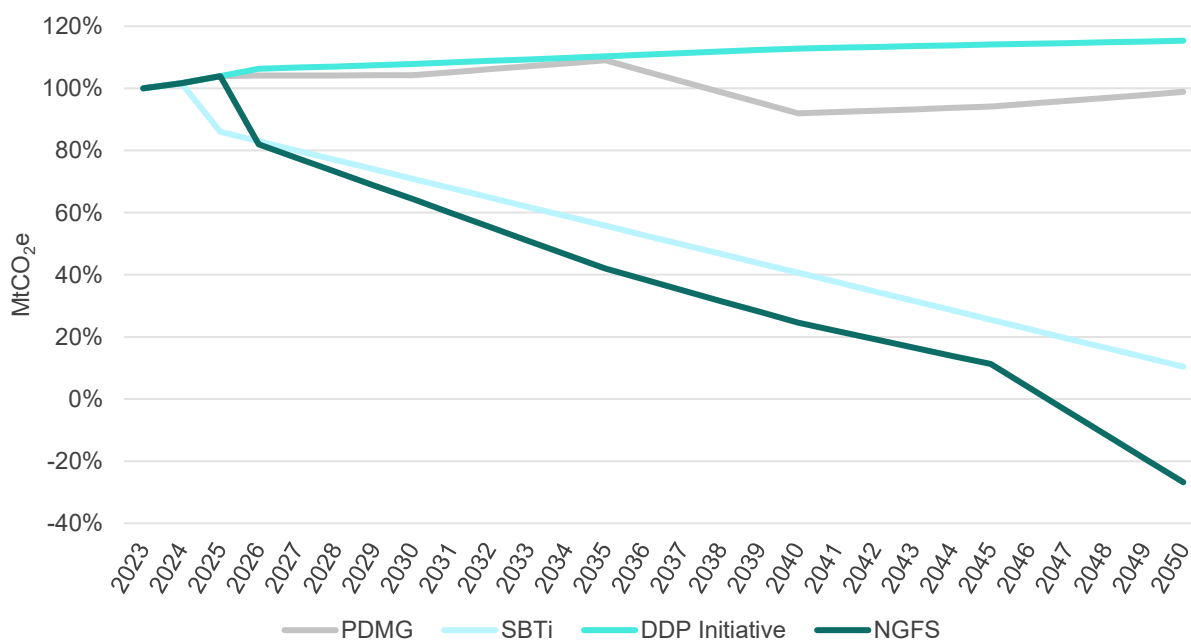
Cenários	Tem dados regionalizados para o Brasil?	Tem dados regionalizados para Minas Gerais?	Tem desagregação setorial compatível com o estudo?	Tem desagregação subsetorial compatível com o estudo?
PDMG (BLUES/COPPE)	✓	✓	✓	✓
NGFS (GCAM)	✓	✗	✓	✓
DDS (DDP Initiative)	✓	✗	✓	✗
SBTi	✗	✗	✗	✗

Fonte: Elaboração própria.

Todos os modelos analisados apresentam vantagens e limitações que merecem consideração. Mesmo o cenário do PDMG requer atualização, já que desde sua elaboração surgiram tecnologias, que não foram originalmente incorporadas, como a penetração de hidrogênio, captura de carbono, a substituição de combustíveis fósseis por fontes de menor impacto nas emissões. Além disso, as tecnologias já previstas no PDMG poderiam ser reavaliadas à luz das atuais perspectivas de desenvolvimento de Minas Gerais.

As distintas abordagens metodológicas empregadas por cada modelo geram, naturalmente, projeções variadas para as necessidades de redução de emissões, como demonstrado na Figura 13. Essa variação reforça a importância de se considerar múltiplas abordagens para uma análise mais robusta.

Figura 13: Trajetória de emissões nos cenários avaliados, em relação ao ano-base 2023

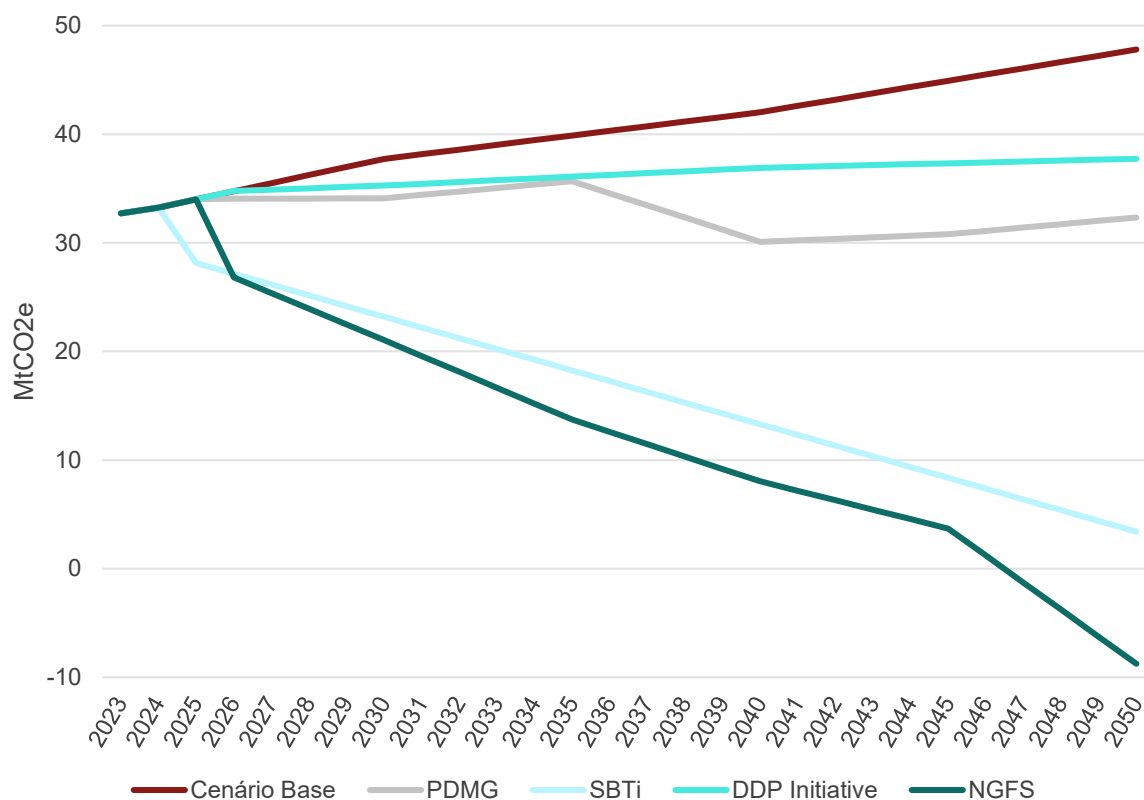


Fonte: Elaboração própria.



A partir das reduções dos cenários *Net Zero*, é possível observar o esforço necessário para que o setor industrial de Minas Gerais se alinhe a cada uma dessas trajetórias.

Figura 14: Comparativo Cenário Base versus Cenários *Net Zero*



Fonte: Elaboração própria.

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

Cenário Rota

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

Tecnologias incluídas na MACC

No produto 2.1 Diagnóstico Setorial (P2.1), foi aplicado um método de classificação e hierarquização das tecnologias levantadas e analisadas, atribuindo notas baseadas em



diferentes critérios. O modelo conceitual desenvolvido pela Accenture e adaptado pela WayCarbon se divide em 3 passos: mitigar a base, acelerar a transição e estender a fronteira (ACCENTURE, 2020).

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

Figura 15: Resultado da avaliação das tecnologias



Fonte: Elaboração própria.

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

Grupo 1 – Eficiência energética: esse grupo engloba um conjunto de tecnologias e soluções que reduzem a intensidade energética da produção industrial, ou seja, reduzem a quantidade de energia necessária para a produção de uma determinada quantidade de produto, sem alterações na rota tecnológica ou na estrutura do processo industrial. Dentre as soluções incluídas, destacam-se: manutenções preventivas, maior controle operacional, automatização de processos, uso de inteligência artificial, recuperação de calor, recuperação de vapor, melhoria nos sistemas de combustão e adições ao clínquer na produção de cimento.

O potencial de eficiência energética para cada setor industrial foi definido com base no estudo, realizado pela EPE, chamado “Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Seleccionados” (EPE, 2018a). Esse estudo apresentou como a indústria brasileira está em relação a indicadores de eficiência energética, indicando a eficiência dos processos industriais, as tecnologias mais eficientes disponíveis, bem como o seu potencial de redução do consumo de energia.



Outro estudo relevante sobre o tema é o “Opções de Mitigação em Setores-Chave”, desenvolvido pelo MCTI em parceria com a ONU Meio Ambiente. (BRASIL, 2017). Esse estudo mapeou diversas tecnologias de mitigação para os setores da economia brasileira. No caso específico da indústria, foram identificadas inúmeras tecnologias de eficiência energética, incluindo suas descrições, o potencial de mitigação e respectivos custos.

Como não há informações a respeito de quais tecnologias de eficiência já estão em uso pelo setor industrial no estado de Minas Gerais, optou-se por abordar as tecnologias de eficiência energética de forma agrupada, a fim de simplificar a análise.

No que diz respeito ao CAPEX, inclui-se o custo adicional de aquisição dos equipamentos em relação aos convencionais, como o custo para implementar um sistema de recuperação de calor ou de otimização da combustão. Por sua vez, o OPEX engloba as diferenças entre os custos de manutenção e as possíveis economias em energia, estimadas com base na eficiência energética dos equipamentos, como caldeiras e fornos, e no custo da energia utilizada.

Grupo 2 – Substituição de combustíveis e uso de fontes alternativas: esse grupo abrange a substituição de combustíveis fósseis por alternativas de baixa emissão de carbono, como eletricidade, biomassa, resíduos sólidos – incluindo resíduos agrícolas (bagaço de cana), urbanos (como pneus) e industriais (como os das indústrias têxtil e de papel) –, além do gás natural¹⁵ e biometano. No segmento de ferro-gusa e aço, destacam-se as tecnologias EAF, forno a carvão vegetal e redução direta, que serão detalhadas posteriormente entre as tecnologias inovadoras.

Em linhas gerais, o uso de fontes alternativas de baixo carbono é uma tecnologia que já é utilizada por diversos setores. Diferentemente das tecnologias de eficiência energética, essa abordagem apresenta maior potencial de mitigação, uma vez que, ao substituir a geração de energia de uma fonte fóssil para uma fonte renovável, as emissões são, praticamente, mitigadas em sua totalidade.

A análise dos custos considerou o CAPEX necessário para instalação dos equipamentos que viabilizam o uso de combustível alternativo e das adequações da planta industrial para utilização de combustíveis derivados de resíduos. Já o OPEX considerou, principalmente, o custo do combustível alternativo, além dos custos necessários para manutenção dos equipamentos.

A implementação dessa tecnologia na indústria envolve elementos como o preço do combustível, disponibilidade de infraestrutura, além de preferências do consumidor. No caso da biomassa, a baixa densidade energética resulta em alto custo logístico, tornando a

¹⁵ Apesar de ser um combustível fóssil, o Gás Natural pode trazer redução de emissões de gases de efeito estufa quando comparado com fontes como coque de petróleo ou carvão mineral.



localização um fator determinante para a sua viabilidade. Já no caso da eletricidade, os altos custos aplicados ao setor industrial também representam uma barreira à sua ampla utilização.

No caso do setor de ferro-gusa e aço, a substituição do uso de carvão mineral por carvão vegetal ou eletricidade envolve a adoção de uma rota tecnológica diferente. Essas tecnologias apresentam limitações técnicas, e sua viabilidade está relacionada à disponibilidade de insumos como sucata e carvão vegetal, em regiões próximas à planta de aço. Esses fatores são condicionantes para a difusão de tecnologias como EAF e BF-BOF a carvão vegetal.

Além dessas alternativas, a substituição do carvão mineral pode ser feita por gás natural por meio da tecnologia de redução direta. Essa rota tem menor intensidade de emissão do que a rota tradicional a carvão mineral. É importante destacar que a necessidade de infraestrutura de transporte de gás natural e o custo desse combustível podem ser fatores impeditivos para a sua adoção.

Grupo 3 – Medidas inovadoras: esse grupo abarca as tecnologias que ainda estão em estágio inicial de maturidade, como captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS, na sigla em inglês) e a redução direta com hidrogênio de baixo carbono.

O CCUS consiste em três etapas principais, começando pela captura do CO₂, que pode ocorrer de diferentes formas: (i) pós-combustão, na qual o CO₂ é separado dos gases após a queima de combustível; (ii) oxy-combustão (queima utilizando oxigênio puro); ou (iii) pré-combustão, na qual a queima com oxigênio puro facilita a separação de CO₂, embora requeira equipamentos adicionais e maior manutenção. Na sequência, o gás é comprimido e transportado até o local de armazenamento, utilizando, preferencialmente, gasodutos já existentes ou adaptados, o que reduz custos logísticos e operacionais. O transporte por navios encontra-se em fase experimental, sendo economicamente viável apenas em casos específicos, enquanto o uso de caminhões ou ferrovias é indicado para curtas distâncias e pequenos volumes. Posteriormente, segue para o armazenamento geológico, como campos de petróleo e gás, aquíferos salinos e formações de carvão, ou utilização em produtos de alto valor agregado, como ureia, materiais de construção e combustíveis sintéticos.

A tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono apresenta um potencial significativo para a descarbonização do setor industrial. Diante da complexidade envolvida na redução de emissões nesse setor e da concentração da geração de CO₂ em locais industriais, essa tecnologia pode desempenhar um papel estratégico. Ela permite a redução das emissões a níveis próximos a 90% e em alguns casos pode trazer emissões negativas, caso o processo industrial seja baseado em fontes renováveis, como a biomassa. Apesar dessa solução ainda não ter um nível de maturidade tecnológica adequado para aplicação em escala industrial e comercial, diversos estudos já mapeiam seus custos e potenciais de mitigação no setor industrial (HASANBEIGI *et al.*, 2013; ZUBERI; PATEL, 2017). Para essa tecnologia, o CAPEX se refere aos custos dos equipamentos e de sua instalação. Já o OPEX engloba os custos ligados à operação do sistema de captura de carbono.



O uso de hidrogênio de baixo carbono tem um papel relevante na descarbonização da produção de ferro-gusa e aço, especialmente por meio da tecnologia de redução direta, que atualmente consiste no uso de gás natural. A substituição do hidrogênio pode ampliar significativamente o potencial de mitigação de emissões nesse processo. No caso dessa tecnologia, o custo de investimento se refere ao custo da implementação de uma planta de redução direta a hidrogênio. O OPEX abrange os custos de combustível além do custo de operação para o funcionamento da planta de redução direta.

Tanto a captura de carbono quanto o uso de hidrogênio têm desafios substanciais, incluindo altos custos de investimento, necessidade de infraestrutura de transporte e elevados custos operacionais, além de questões regulatórias que precisam ser abordadas, como a regulamentação do armazenamento geológico de CO₂ ou aspectos ligados ao mercado de hidrogênio (EPE, 2022, 2024).

Tecnologias não incluídas na MACC

É importante destacar que algumas tecnologias não foram incluídas na MACC devido à falta de dados confiáveis, tanto operacionais, como rendimento energético e custos de manutenção, quanto de mercado, como o valor dos ativos e da infraestrutura necessária. Além disso, a baixa maturidade dessas tecnologias em relação aos resultados práticos obtidos limitou sua inclusão na análise. A ausência dessas informações inviabiliza a realização de estimativas robustas. Ainda assim, tais tecnologias serão apresentadas, de forma complementar, com o objetivo de aplicar a análise sobre as medidas de mitigação do setor de indústria e apoiar sua consideração em estudos futuros. As tecnologias abordadas são:

- fusão redutora para produção de aço;
- redução do minério de ferro por eletrólise;
- uso de energia solar térmica para produção de calor em processos industriais;
- uso de reatores nucleares para produção de calor em processos industriais;
- uso de hidrogênio para produção de calor em processos industriais.

Fusão redutora para produção de aço – essa é uma tecnologia que elimina a necessidade de produção de coque na siderurgia ao separar o processo em duas etapas: pré-aquecimento do carvão e pré-redução do minério de ferro. Essa abordagem pode reduzir o consumo de energia em cerca de 20% (IEA, 2020). Tecnologias como Hlsarna, Corex e Finex geram um gás com alta concentração de CO₂, permitindo acoplamento a sistemas de captura, utilização e armazenamento de CCUS e redução significativa das emissões. Além disso, essas rotas oferecem flexibilidade para o uso de biomassa e hidrogênio como insumo energético e agente redutor.

Entretanto, há apenas o registro de uma planta-piloto com a tecnologia Hlsarna em operação, localizada na Holanda (MEIJER *et al.*, 2012), sem previsão para construção de reator em escala comercial (AGORA INDUSTRY; WUPPERTAL INSTITUTE; LUND UNIVERSITY, 2024). Já a tecnologia Corex é mais difundida em países como África do Sul, Coreia do Sul e



China, não havendo registros no Brasil (BRASIL, 2017). Quanto à tecnologia Finex, há o registro de apenas uma planta comercial na unidade Posco Pohang Work, na Coreia do Sul (BRAZIL, 2017; LEE *et al.*, 2012).

Redução do minério de ferro por eletrólise – essa tecnologia de eletrólise consiste na redução eletrolítica do minério de ferro, utilizando eletricidade como fonte de energia. Entre as principais tecnologias estão a *Molten Oxide Electrolysis* (MOE), desenvolvida pela Boston Metal, e os processos ULCOLYSIS/ULCOWIN, vinculados ao programa ULCOS. De acordo com a Boston Metal (2021), a produção de uma tonelada de aço consome atualmente cerca de 5,5 MWh (19,8 GJ), com potencial de redução para 4,0 MWh (14,4 GJ). Para fins de comparação, o consumo da tecnologia BF-BOF é de cerca 18-24 GJ por tonelada de aço produzido.

Apesar de seu potencial, essas tecnologias ainda se encontram em estágios iniciais de desenvolvimento tecnológico, especialmente quando comparadas a métodos mais consolidados, como EAF, uso do carvão vegetal ou mesmo a redução direta a hidrogênio, esta última em estágio de demonstração, o que limita sua inclusão na análise deste trabalho. No entanto, à medida que avancem em maturidade tecnológica, essas rotas poderão desempenhar um papel importante, especialmente porque, quando associadas ao uso de eletricidade de fontes renováveis ou carvão vegetal, podem alcançar emissões nulas de CO₂ (IEA, 2020).

De forma geral, as fontes consideradas para a mitigação do consumo energético focam a eletrificação e o uso de biomassa. Essa escolha se deve ao fato de essas tecnologias já apresentarem um elevado nível de maturidade tecnológica e serem amplamente utilizadas pelo setor industrial. Entretanto, é importante ressaltar a possibilidade de utilização de outras fontes, como a energia solar térmica, a energia nuclear e o hidrogênio para geração de calor de forma transversal ao setor industrial (THIEL; STARK, 2021).

Uso de energia solar térmica para produção de calor em processos industriais – essa tecnologia consiste na captação do fluxo de calor da radiação solar mediante coletores, como placas planas, coletores de tubos a vácuo e coletores concentradores. O relatório “Energia Termossolar para a Indústria: Brasil” (SOLAR PAYBACK, 2018) indica que segmentos industriais como alimentos e bebidas, papel e celulose, química e têxtil podem se beneficiar do uso dessa tecnologia, especialmente devido à sua demanda por calor de baixa temperatura. No entanto, seu uso em processos industriais enfrenta três principais desafios: (i) intermitência, gerando variações da geração de energia em função de condições climáticas como dias nublados ou chuvosos; (ii) baixa densidade de potência por área, gerando a necessidade de espaços vastos para a instalação dos equipamentos; e (iii) limites de temperatura atingível, que pode ser uma barreira técnica para alguns segmentos industriais que operam em temperaturas acima de 400 °C. Dessa forma, para que essa tecnologia possa ser utilizada, é necessário mais investimento em pesquisa e desenvolvimento para garantir melhor desempenho na geração de calor.



Uso de reatores nucleares para produção de calor em processos industriais – essa tecnologia pode ser considerada uma fonte potencial de calor de longa duração, já que os combustíveis nucleares como o urânio têm alta densidade energética, o que os torna uma fonte viável de calor por longos períodos, podendo se estender por muitos anos ou até séculos. Diferentemente da energia solar térmica, a geração nuclear de calor não sofre com intermitência. No entanto, o custo do calor nuclear ainda é superior ao de alternativas fósseis, principalmente devido aos altos custos associados ao ciclo de vapor e do gerador. Além disso, reatores comerciais atuais operam com temperaturas máximas próximas a 300 °C, insuficientes para boa parte das demandas térmicas industriais. Novas tecnologias como reatores modulares pequenos (SMRs), microrreatores e reatores de gás de alta temperatura (HTGRs) visam superar essas limitações (THIEL; STARK, 2021). No entanto, essas tecnologias ainda se encontram em estágios iniciais de desenvolvimento tecnológico e requerem avanços significativos em pesquisa e desenvolvimento para que possam ser aplicadas em escala industrial.

Uso de hidrogênio para produção de calor em processos industriais – para essa tecnologia, embora o hidrogênio já seja um produto industrial consolidado, seu uso como fonte de energia ainda é incipiente. Devido ao seu alto custo, sua utilização como fonte de calor não é economicamente viável. Além disso, o hidrogênio apresenta desafios adicionais como armazenamento e transporte (THIEL; STARK, 2021). Diante desses obstáculos, optou-se por não considerar seu uso de forma transversal aos diversos segmentos da indústria, focando a análise apenas na siderurgia, setor no qual o hidrogênio tem despertado maior interesse industrial.

Premissas e avaliação do Cenário Rota

É fundamental destacar que a ordem de entrada das tecnologias no cenário influencia diretamente os resultados esperados de mitigação. Por exemplo, o aumento da eficiência energética poderia ter um potencial de mitigação menor se houvesse um aumento do uso de biomassa, caso essa medida fosse avaliada diretamente em relação ao Cenário Base. Sendo assim, para a construção da MACC, as tecnologias foram inseridas no cenário de acordo com a classificação que receberam no diagnóstico setorial (produto P2.1), iniciando pelas de maior nota e avançando para as de menor nota (as notas podem ser observadas na Tabela 11). Essa abordagem busca garantir que a eficácia de cada medida seja avaliada considerando-se as interações com ações já implementadas.

Dessa forma, esse protocolo aprimora a análise do cenário projetado na metodologia MACC, que avalia os impactos conjuntos e interdependentes das tecnologias. Ao utilizar a pontuação do P2.1 para definir a ordem de inserção das tecnologias, o protocolo garante que o processo de análise leve em conta a influência dessa sequência de maneira lógica e consistente, contribuindo para uma tomada de decisão estratégica para a descarbonização do setor de indústria de Minas Gerais.

Para fundamentar a avaliação das tecnologias de descarbonização, o estudo baseou-se em uma revisão documental abrangente. Essa revisão incluiu documentos estratégicos de Minas Gerais, como o Plano de Descarbonização (PDMG) e o Plano de Ação Climática (PLAC-MG),



além de uma série de estudos relevantes conduzidos por instituições nacionais (a exemplo da EPE e da COPPE/UFRJ), agências internacionais como a *International Energy Agency* (IEA) e o *United Nations Environment Programme* (UNEP). Além das iniciativas do setor privado, como o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), oferecendo uma visão ampla das tecnologias no médio (2035) e longo prazo (2050).

A partir das projeções, dados e informações levantados nessas referências,¹⁶ e considerando as características específicas do estado de Minas Gerais, bem como a *expertise* da equipe técnica para interpretar e adaptar esses dados ao contexto local, foi determinado o percentual de aplicação projetado para cada tecnologia ao longo do horizonte de estudo, apresentado na coluna “Premissa considerada (%)”, na Tabela 11. Esse percentual é um dado fundamental, pois ele quantifica a escala de implementação de cada tecnologia no cenário, sendo essencial para o cálculo de seus respectivos custos e benefícios.

Com base nesse percentual de aplicação definido, foram então estimados o VPL, o potencial acumulado de redução de emissões de GEE e o custo marginal de abatimento associado a cada tecnologia. A Tabela 11 apresenta detalhadamente todos esses resultados quantitativos para cada tecnologia, oferecendo uma visão clara de sua viabilidade econômica e do impacto ambiental esperado no contexto avaliado. A representação gráfica desses resultados na forma da MACC é apresentada na Figura 16.

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

¹⁶ Fontes consideradas para embasar as estimativas e oferecer suporte às análises realizadas: EPE (2018a; 2018b), Brasil (2017), Hebeda (2024), Arens; Worrel; Schleich (2012); EUROFER (2013); Otto *et al.* (2017); TecnoRed (2021); Van Ruijven *et al.* (2016); Vogl; Olsson; Nykvist (2021); Agora Industry; Wuppertal Institute; Lund University (2024); Hasanbeigi *et al.* (2013); Hasanbeigi; Menke; Price (2010); Morrow *et al.* (2014); Xu; Yi; Fan (2016); Zuberi; Patel (2017); Gardarsdottir *et al.* (2019); Voldsund *et al.* (2019).



Tabela 11: Síntese das premissas e dos resultados da MACC – setor de indústria

Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Nota	Limite inferior (%)	Limite superior (%)	Metas do PLAC-MG	Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/tCO ₂ e)	VPL (10 ⁹ R\$)	Mitigação acumulada (MtCO ₂ e)
Ferro-gusa e aço									
Eficiência energética (G1)	Aumento na eficiência energética da produção de aço	54	0	15	Reduzir o consumo de energia e combustíveis nos segmentos industriais por meio de medidas de eficiência energética; Reduzir a emissão específica (tCO ₂ /t produto) na produção siderúrgica referente ao ano de 2020	12 ¹⁷	17	-0,32	19,43
Forno a arco elétrico (EAF) (G2)	Aumento da produção de aço por meio de EAF	54	8	100	Reduzir a emissão específica (tCO ₂ /t produto) na produção siderúrgica referente ao ano de 2020	16 ¹⁸	88	-2,07	23,47
BF-BOF a carvão vegetal (G2)	Aumento da participação de BF-BOF a carvão vegetal na produção de aço	36	17	100	Ampliação do uso do carvão vegetal e biomassa em processos industriais em substituição parcial de agentes redutores fósseis e/ou fonte de combustível, em especial na produção siderúrgica; Reduzir a emissão específica (tCO ₂ /t produto) na produção siderúrgica referente ao ano de 2020	25 ¹⁸	243	-5,71	23,45

¹⁷ Referente ao ganho de eficiência em todas as rotas tecnológicas, aplicado a 100% da produção de aço.

¹⁸ Este valor ao percentual da produção de aço feito a partir desta rota tecnológica no ano de 2050. Como exemplo, no caso de EAF, a produção sai de 8% em 2023, indicado na coluna “Limite inferior (%)”, para 16%, indicado pela coluna “Premissa considerada (%)”



Redução direta a gás natural (RD-GN) (G2)	Aumento da participação de RD-GN na produção de aço	12	0	100	Inserção e ampliação do uso do hidrogênio, ou outras tecnologias de baixo carbono, em processos industriais para a substituição de combustíveis e materiais, em especial na produção siderúrgica; Reduzir a emissão específica (tCO ₂ /t produto) na produção siderúrgica referente ao ano de 2020	15 ¹⁸	695	-19,33	27,81
Redução direta a hidrogênio (RD-H2) (G3)	Aumento da participação de RD-H2 na produção de aço	6	0	100	Inserção e ampliação do uso do hidrogênio, ou outras tecnologias de baixo carbono, em processos industriais para a substituição de combustíveis e materiais, em especial na produção siderúrgica; Reduzir a emissão específica (tCO ₂ /t produto) na produção siderúrgica referente ao ano de 2020	10 ¹⁸	411	-6,46	15,69
Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) (G3)	Implementação de CCS na produção de aço	6	0	100	Realizar ações de promoção da ampliação do potencial técnico-econômico da aplicação de rotas de captura e armazenamento de carbono nos processos industriais	25 ¹⁸	398	-4,15	10,43



Ferroligas

Eficiência energética (G1)	Aumento na eficiência energética da produção de ferroligas	27	0	15	Reduzir o consumo de energia e combustíveis nos segmentos industriais por meio de medidas de eficiência energética	8 ¹⁹	96	-0,01	0,16
Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como biometano, carvão vegetal e eletricidade, na produção de ferroligas	12	Eletricidade: 9 Biometano: 0 Lenha: 47	100	Ampliação do uso do carvão vegetal e biomassa em processos industriais em substituição parcial de agentes reductores fósseis e/ou fonte de combustível	Eletricidade: 20 ²⁰ Biometano: 5 ¹⁸ Carvão vegetal: 55 ¹⁸	22	-0,02	0,98

Cimento

Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como eletricidade, carvão vegetal e outras biomassas, na produção de cimento	54	Eletricidade: 15 Carvão vegetal: 21 Outras biomassas: 9%	100	Ampliação do uso do carvão vegetal e biomassa em processos industriais em substituição parcial de agentes reductores fósseis e/ou fonte de combustível; Reduzir a emissão específica (tCO ₂ /t produto) na produção de cimento referente ao ano de 2020	Eletricidade: 15 ¹⁸ Carvão vegetal: 25 ¹⁸ Outras biomassas: 30 ¹⁸	46	-0,71	15,44
Eficiência energética (G1)	Aumento na eficiência energética da produção de cimento	54	0	13	Reduzir o consumo de energia e combustíveis nos segmentos industriais por meio de medidas de eficiência energética; Reduzir a emissão específica (tCO ₂ /t produto) na produção de cimento referente ao ano de 2020	9 ²¹	-128	0,63	4,94

¹⁹ Referente ao ganho de eficiência em todas as rotas tecnológicas, aplicado a 100% da produção de ferroligas.

²⁰ Este valor se refere ao percentual da participação do combustível na matriz energética do setor no ano de 2050. Os valores indicados na coluna "Limite inferior (%)" refletem os valores no ano base da análise. Como exemplo, a eletricidade sai de 9% para 20%.

²¹ Referente ao ganho de eficiência em todas as rotas tecnológicas, aplicado a 100% da produção de cimento.



Adições ao clínquer (G1)	Redução da razão clínquer/cimento	12	0	45	Aumentar o uso de adições e substitutos de clínquer e do uso de combustíveis alternativos na produção de cimento; Reduzir a emissão específica (tCO ₂ /t produto) na produção de cimento referente ao ano de 2020	30 ²²	14	-0,55	38,67
Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) (G3)	Implementação de CCS na produção de cimento	6	0	100	Realizar ações de promoção da ampliação do potencial técnico-econômico da aplicação de rotas de captura e armazenamento de carbono nos processos industriais	9 ¹⁸	1.431	-6,15	4,30
Química									
Eficiência Energética (G1)	Aumento na eficiência energética da indústria química	27	0	13	Reduzir o consumo de energia e combustíveis nos segmentos industriais por meio de medidas de eficiência energética	12 ²³	-1.206	0,78	0,65
Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como eletricidade e biometano, na indústria química	12	Eletricidade: 55 Biometano: 0	100	Ampliação do uso do carvão vegetal e biomassa em processos industriais em substituição parcial de agentes redutores fósseis e/ou fonte de combustível	Eletricidade: 65 ¹⁸ Biometano: 15 ¹⁸	673	-2,72	4,04
Mineração									
Eficiência energética (G1)	Aumento na eficiência energética da mineração	27	0	11	Reduzir o consumo de energia e combustíveis nos segmentos industriais por meio de medidas de eficiência energética	10 ²⁴	-154	0,39	2,51

²² Referente à redução da razão clínquer/cimento em 100% da produção de cimento.

²³ Referente ao ganho de eficiência em todas as rotas tecnológicas, aplicado a 100% da produção química.

²⁴ Referente ao ganho de eficiência em todas as rotas tecnológicas, aplicado a 100% da mineração.

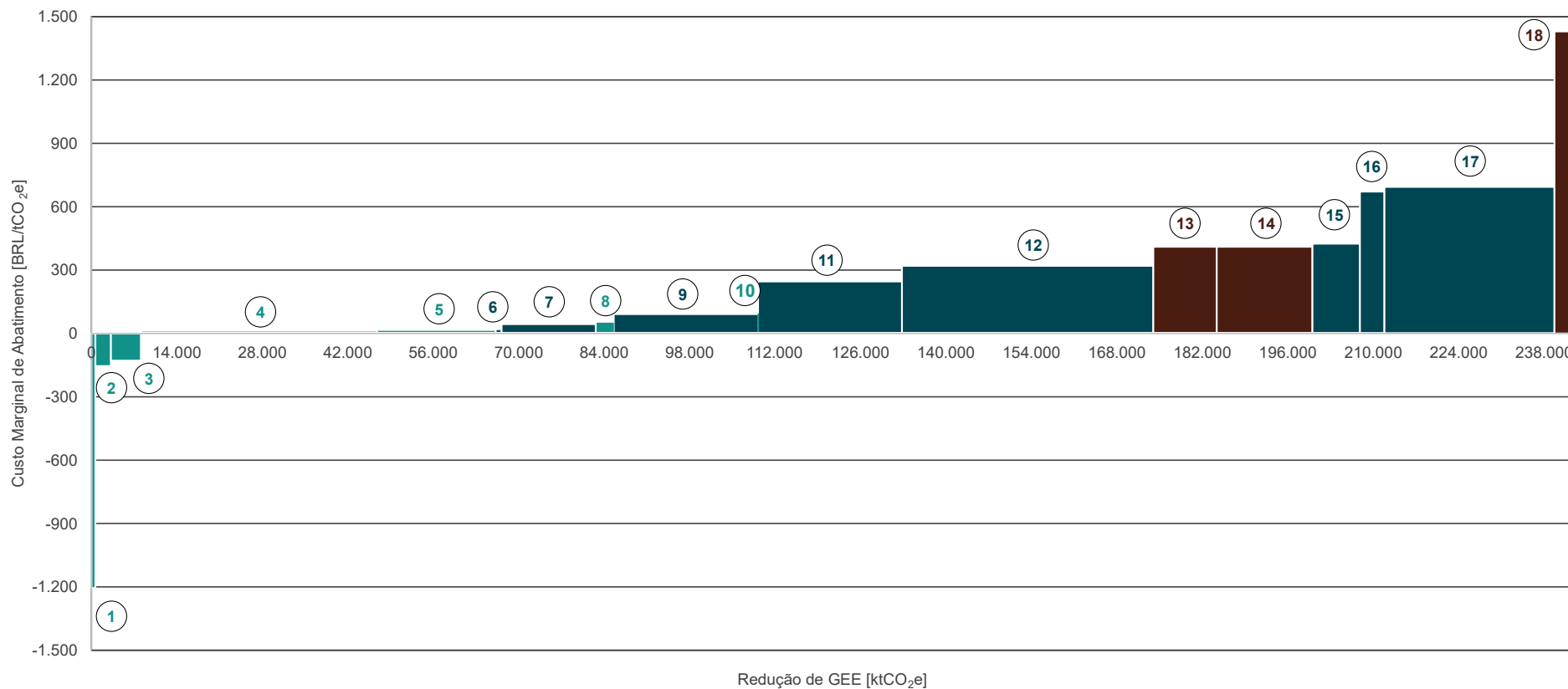


Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como eletricidade e biometano, na mineração	12	Eletricidade: 31 Biometano: 0	100	Ampliação do uso do carvão vegetal e biomassa em processos industriais em substituição parcial de agentes redutores fósseis e/ou fonte de combustível	Eletricidade: 60 ¹⁸ Biometano: 7 ¹⁸	426	-3,31	7,77
Outras Indústrias									
Eficiência energética (G1)	Aumento na eficiência energética da produção de outras indústrias	27	0	13	Ampliação do uso do carvão vegetal e biomassa em processos industriais em substituição parcial de agentes redutores fósseis e/ou fonte de combustível	8 ²⁵	56	-0,17	3,09
Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como eletricidade, lenha e biometano, na produção de outras indústrias	12	Eletricidade: 35 Lenha: 15 Biometano: 0	100	Ampliação do uso do carvão vegetal e biomassa em processos industriais em substituição parcial de agentes redutores fósseis e/ou fonte de combustível,	Eletricidade: 45 ¹⁸ Lenha: 17 ¹⁸ Biometano: 4 ¹⁸	321	-13,2	41,15

Fonte: Elaboração própria.

²⁵ Referente ao ganho de eficiência em todas as rotas tecnológicas, aplicado a 100% da produção de outras indústrias.

Figura 16: Resultados da MACC do setor de indústria



- | | | | | | | | |
|---|---|----|--|----|--|---------------|---------|
| 1 | Eficiência energética – Química | 7 | Substituição de combustíveis fósseis – Cimento | 13 | CCS – Ferro-gusa e Aço | Classificação | Grupo 1 |
| 2 | Eficiência energética – Mineração | 8 | Eficiência energética – Outras indústrias | 14 | Redução direta a H ₂ – Ferro-gusa e Aço | | Grupo 2 |
| 3 | Eficiência energética – Cimento | 9 | EAF – Ferro-gusa e Aço | 15 | Substituição de combustíveis fósseis – Mineração | | Grupo 3 |
| 4 | Aditivo ao clínquer – Cimento | 10 | Eficiência energética – Ferroligas | 16 | Substituição de combustíveis fósseis – Química | | |
| 5 | Eficiência energética – Ferro-gusa e Aço | 11 | Carvão vegetal – Ferro-gusa e Aço | 17 | Redução direta a gás natural – Ferro-gusa e Aço | | |
| 6 | Substituição de combustíveis fósseis – Ferroligas | 12 | Substituição de combustíveis fósseis – Outras indústrias | 18 | CCS – Cimento | | |

Fonte: Elaboração própria.

De forma transversal, as tecnologias de eficiência energética (Grupo 1) apresentam o menor custo de mitigação. Esse resultado é condizente com a nota atribuída na avaliação das tecnologias no diagnóstico de indústria (P2.1). Em setores como química, mineração e cimento, essa medida apresentou custos marginais de abatimento negativos. Isso se deve ao fato de que, embora possam exigir investimentos iniciais elevados, geram economias diretas com a redução no consumo de combustíveis, o que pode resultar em custos marginais de abatimento inferiores a zero. Um exemplo é o caso da indústria de mineração, cujo VPL totalizou -0,39 bilhões de reais. Apesar da necessidade de investimentos para introduzir essa tecnologia, a redução dos custos com energia traz economia para o setor. Entretanto, é importante destacar que, apesar do custo marginal de abatimento negativo dentro do horizonte considerado, a implementação de medidas de eficiência energética apresenta barreiras, como o elevado custo inicial do investimento (CAPEX). Algumas dessas tecnologias têm tempo de *payback* longo, fazendo com que essas medidas percam atratividade em relação a outros investimentos.

Outra tecnologia abordada dentro do Grupo 1 foi o uso de adições ao clínquer na produção de cimento, a qual representou a segunda solução com maior potencial de redução de emissões, com um resultado aproximado de 39 MtCO₂e no período avaliado de 2025-2050. Seu elevado potencial de mitigação está relacionado à redução das emissões que acontecem no processo de calcinação, principal fonte de emissões de GEE da produção de cimento. Em relação ao custo marginal de abatimento, de 14 R\$/tCO₂e, é um dos menores quando comparado com as demais tecnologias avaliadas na MACC, indicando que é uma das medidas mais eficientes para redução das emissões não só no segmento, mas no contexto geral do setor industrial. É importante destacar que o uso de adições ao clínquer pode encontrar barreiras na disponibilidade de oferta desses aditivos, como cinzas e pozolanas. Somadas, as medidas do Grupo 1 totalizam uma redução acumulada de, aproximadamente, 69 MtCO₂e, representando 28% das reduções obtidas para o setor de indústria.

A análise da Tabela 11 e da Figura 16 mostra que as tecnologias do Grupo 2, substituição de combustíveis, têm um vasto potencial de mitigação. Essas soluções, aplicadas de forma transversal a diversos setores, obtiveram um bom desempenho, uma vez que grande parte das emissões do setor industrial é fruto da queima de combustíveis fósseis para geração de energia. Como resultado, estima-se uma mitigação acumulada, entre 2025 e 2050, de aproximadamente 144 MtCO₂e, sendo responsável por 59% das reduções de emissões do setor industrial no Cenário Rota. As maiores parcelas dessas reduções de emissões foram de 41 MtCO₂e no setor intitulado “Outras Indústrias” (componente da agregação “demais segmentos industriais”), 74 MtCO₂e no setor de ferro-gusa e aço, cerca de 15,4 MtCO₂e na indústria de cimento e 7,8 MtCO₂e no setor de mineração.

O custo marginal de abatimento de substituição de combustíveis (Grupo 2) varia entre os setores, oscilando de R\$ 22 até cerca de 695 R\$ por tonelada de CO₂e mitigado. Essa diferença acontece em função do perfil energético de cada setor e do preço dos combustíveis. Isto é, se o setor apresenta como fonte principal um combustível mais barato que o combustível substituído, o custo desse abatimento tende a ser maior, quando ocorre uma maior



diferença entre eles. A substituição de combustível na indústria de ferroligas apresentou um dos menores custos marginais (R\$ 22/tCO₂e). No entanto, apesar desse resultado, sua mitigação acumulada é uma das menores dentre os demais segmentos industriais (0,98 MtCO₂e). O baixo custo dessa tecnologia pode ser atribuído à substituição do óleo diesel, um combustível de alto custo, por fontes mais competitivas como carvão vegetal. Por outro lado, a indústria química apresentou um dos maiores custos de mitigação nessa categoria, atingindo cerca de R\$ 673/tCO₂e. Isso se deve, principalmente, à substituição de combustíveis de baixo custo, como óleo combustível e coque de petróleo, por fontes mais caras como eletricidade e biomassa. Essa troca eleva significativamente o custo marginal de abatimento, dada a diferença de preços entre as fontes energéticas.

Neste estudo, o foco da substituição foi por meio da eletrificação e do uso de fontes de biomassa. Apesar de já serem utilizadas pelo setor para gerar calor, em linhas gerais, essas fontes têm custo unitário mais elevado quando comparadas a fontes fósseis como óleo combustível ou carvão mineral. Como foi mencionado, o principal desafio para ampliação dessa tecnologia é o custo, que pode se elevar significativamente em função de fatores logísticos.

Em seguida, o setor de ferro-gusa e aço concentra as medidas com maior potencial de mitigação. Isto também é reflexo da alta participação das emissões desse segmento dentro do setor industrial como um todo. As rotas de produção já utilizadas pelo setor, BF-BOF com carvão vegetal e EAF (Grupo 2), são aquelas que têm menor custo de mitigação quando comparadas às demais alternativas dentro do próprio setor. Ambas as tecnologias contribuem com uma redução de aproximadamente 23 MtCO₂e (por tecnologia) no período de 2025 a 2050, com um custo marginal de abatimento de 88 R\$/tCO₂e para a tecnologia EAF e de 243 R\$/tCO₂e para a tecnologia baseada em carvão vegetal. Assim como outros segmentos, a indústria de ferro-gusa e aço enfrenta desafios específicos para a substituição de combustíveis. A disponibilidade de carvão vegetal nas proximidades do polo industrial é importante para viabilizar o uso dessa tecnologia. Já em relação à tecnologia EAF, além do custo de eletricidade, a oferta de sucata ferrosa é um fator determinante para sua expansão.

A redução direta com gás natural no segmento de ferro-gusa e aço (Grupo 2) também apresenta um alto potencial de mitigação acumulada, superando os 27 MtCO₂e no intervalo da análise. No entanto, por ser uma tecnologia intensiva no uso de gás natural, um combustível mais caro que o carvão mineral utilizado pelo setor, seu custo marginal de abatimento é mais elevado, chegando a 695 R\$/tCO₂e, quando comparado às demais tecnologias já utilizadas. Embora o Brasil tenha perspectivas de crescimento da oferta de gás natural, não está claro se esse aumento de oferta auxiliará a reduzir os custos dessa molécula, que poderia contribuir para alavancar o uso da redução direta no setor. Além disso, para utilizar essa fonte de energia, é necessário o investimento em infraestrutura de transporte do gás para alcançar os consumidores, o que pode se refletir em um aumento do preço do gás natural, criando mais uma barreira para sua aplicação.



Já a redução direta com hidrogênio no segmento de ferro-gusa e aço, tecnologia pertencente ao Grupo 3, apresentou menor nível de mitigação em relação à redução direta com gás natural, totalizando 16 MtCO₂e, devido a sua menor penetração no mercado, prevista apenas a partir de 2040, tendo em vista o nível de maturidade dessa tecnologia. Seu custo marginal de abatimento está entre um dos mais elevados para o segmento, alcançando 411 R\$/tCO₂e. Esse elevado custo, somado ao nível de desenvolvimento inicial da tecnologia, traz incertezas para o mercado. Diferentemente das tecnologias apresentadas até aqui, o hidrogênio na siderurgia ainda é incipiente. Entretanto, os investimentos crescentes em pesquisa e desenvolvimento poderão contribuir para a redução de seus custos. É importante destacar que o transporte e armazenamento de hidrogênio são um dos principais desafios para sua utilização, exigindo grandes investimentos em infraestrutura para garantir o suprimento contínuo às plantas siderúrgicas.

Apesar de apresentar um elevado potencial de abatimento quando considerada isoladamente, com uma redução acumulada de aproximadamente 15 MtCO₂e, a tecnologia de captura de carbono (Grupo 3) se apresenta como uma das tecnologias mais caras dentre as avaliadas, com custos variando entre 398 e 1.431 R\$/tCO₂e. Esses valores demonstram a dificuldade que o setor industrial deverá enfrentar para atingir seus compromissos de redução das emissões de GEE. Assim como no caso do hidrogênio, o CCS é uma tecnologia em desenvolvimento, que ainda apresenta muitas incertezas. Além disso, a implementação dessa tecnologia requer infraestrutura robusta para o transporte do carbono até os reservatórios ou fontes de uso, garantindo que o carbono seja capturado.

Em linhas gerais, o segmento de ferro-gusa e aço é aquele que apresentou maior potencial de mitigação ao longo do período analisado, respondendo por cerca de 49% de toda a redução de emissão do setor industrial, um reflexo direto de sua contribuição para as emissões de GEE. No entanto, o custo marginal de abatimento das tecnologias associado a esse desempenho é elevado, uma vez que depende de tecnologias não difundidas, como a redução direta com gás natural (Grupo 2), além do uso do hidrogênio e da captura de carbono (Grupo 3).

A indústria de cimento também apresenta um alto potencial de redução das emissões, sendo o segundo setor com maior potencial, com aproximadamente 26% da mitigação no período de análise. Já o custo de abatimento de suas tecnologias é inferior ao da indústria de ferro-gusa e aço, uma vez que grande parte das reduções das emissões pode ser alcançada por meio de tecnologias já consolidadas, como é o caso da substituição de fontes fósseis por combustíveis alternativos de baixa emissão (ex.: resíduos). Entretanto, a captura de carbono tem alto custo, o que acrescenta um desafio relevante para que o setor atinja seus compromissos climáticos.

A dependência de tecnologias inovadoras tanto nos processos de produção de ferro-gusa e aço quanto na indústria de cimento reflete os desafios enfrentados por ambos os setores para alcançar reduções robustas de emissões para o setor industrial.



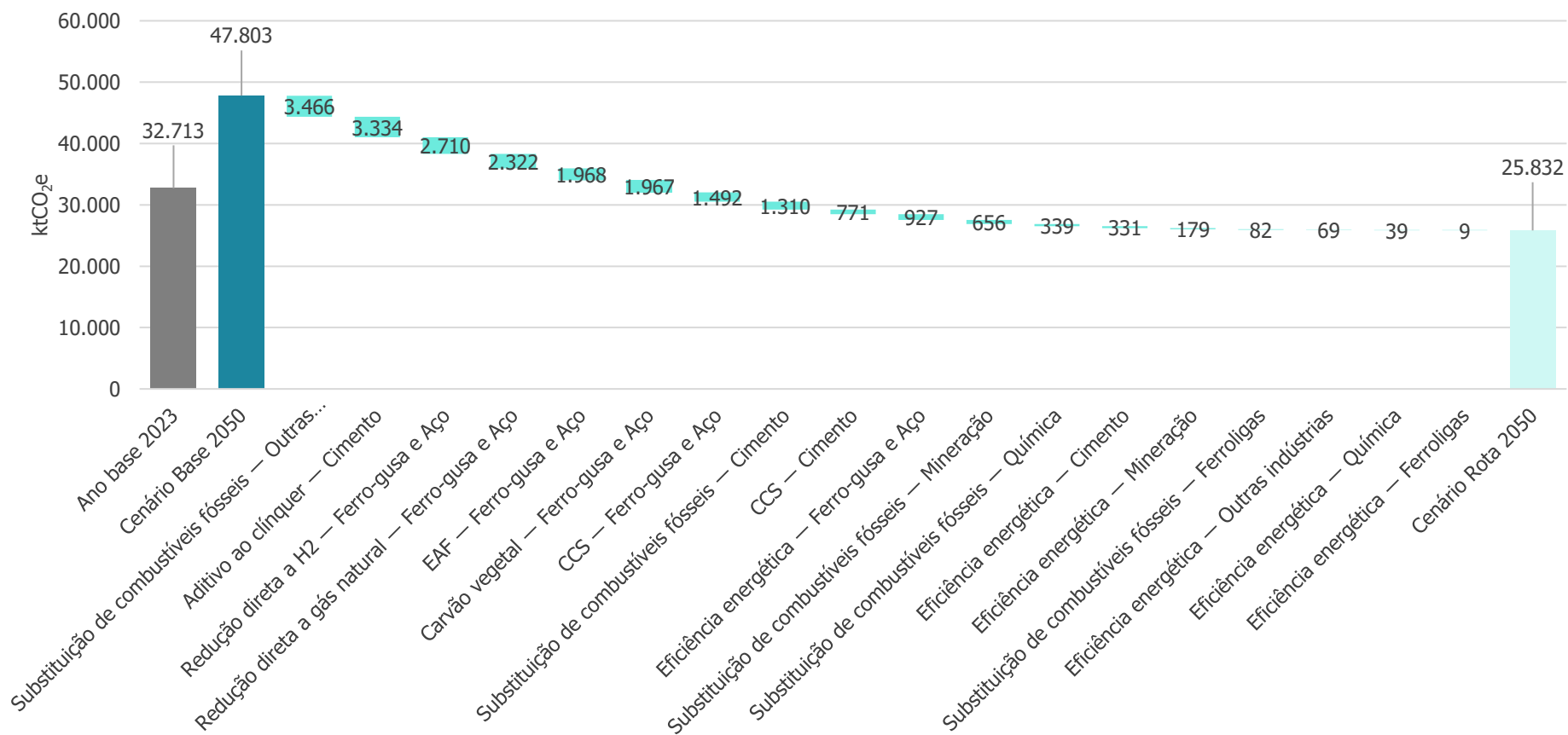
Os demais segmentos industriais corresponderam a cerca de 25% da mitigação total no período analisado. Esses setores podem contar com medidas já consolidadas (Grupos 1 e 2) para atingir suas metas de redução de forma mais custo efetiva do que os setores de ferro-gusa e aço e cimento. Isso se deve ao fato de que os demais segmentos não têm processos complexos, sendo que a maior parte das emissões de GEE se concentram na queima de combustíveis para geração de calor. Entretanto, é importante ressaltar que a indústria química e de cimento tiveram altos custos marginais de abatimento na substituição de combustíveis (Grupo 2), uma vez que as opções que podem contribuir para redução do consumo de fontes fósseis como o gás natural e eletricidade são alternativas mais caras, o que impõe desafios adicionais à sua viabilidade econômica.

É crucial notar, contudo, que o cálculo do custo marginal de abatimento considera a relação entre o custo financeiro e a redução das emissões de GEE, não contemplando outros aspectos importantes e benefícios estratégicos relacionados à indústria. Entre esses benefícios, vale mencionar que o desenvolvimento de uma indústria baseada em fontes renováveis como carvão vegetal, biometano e eletricidade pode contribuir para a geração de empregos e renda no estado. Um exemplo disso é no setor de ferro-gusa e aço, cuja principal fonte de energia, o carvão mineral metalúrgico, é importado. A substituição dessa fonte por alternativas renováveis, como o carvão vegetal, tem o potencial de dinamizar cadeias produtivas locais, gerando empregos em diferentes elos da cadeia energética. Já no caso da indústria de cimento, o aumento do uso de resíduos garante um destino mais apropriado desses materiais, especialmente em um contexto no qual lixões e aterros sanitários ainda representam um desafio para muitos municípios brasileiros. Portanto, embora o custo marginal de abatimento seja um fator a ser considerado, uma avaliação abrangente das tecnologias abordadas neste estudo pode desencadear estudos complementares que levem em conta impactos socioeconômicos mais amplos, contribuindo para uma tomada de decisão ainda mais estratégica.

Além disso, é fundamental compreender a natureza sequencial da análise da MACC: a aplicação de uma tecnologia que reduza as emissões altera o cenário de mitigação para as medidas subsequentes. Assim, a ordem em que as tecnologias são consideradas (ou modeladas como sendo implementadas) influencia diretamente tanto o potencial de abatimento remanescente quanto a relação custo-benefício das opções posteriores. Conseqüentemente, estudos que adotem diferentes sequências de implementação podem apresentar curva MAC e estimativas de mitigação distintas. A partir do cálculo da redução de emissões das tecnologias avaliadas, conforme detalhado na Tabela 11 foi possível estimar o Cenário Rota e o potencial com que cada tecnologia contribui para a redução de emissão até 2050, conforme pode ser observado na Figura 17.



Figura 17: Resultado da avaliação das tecnologias



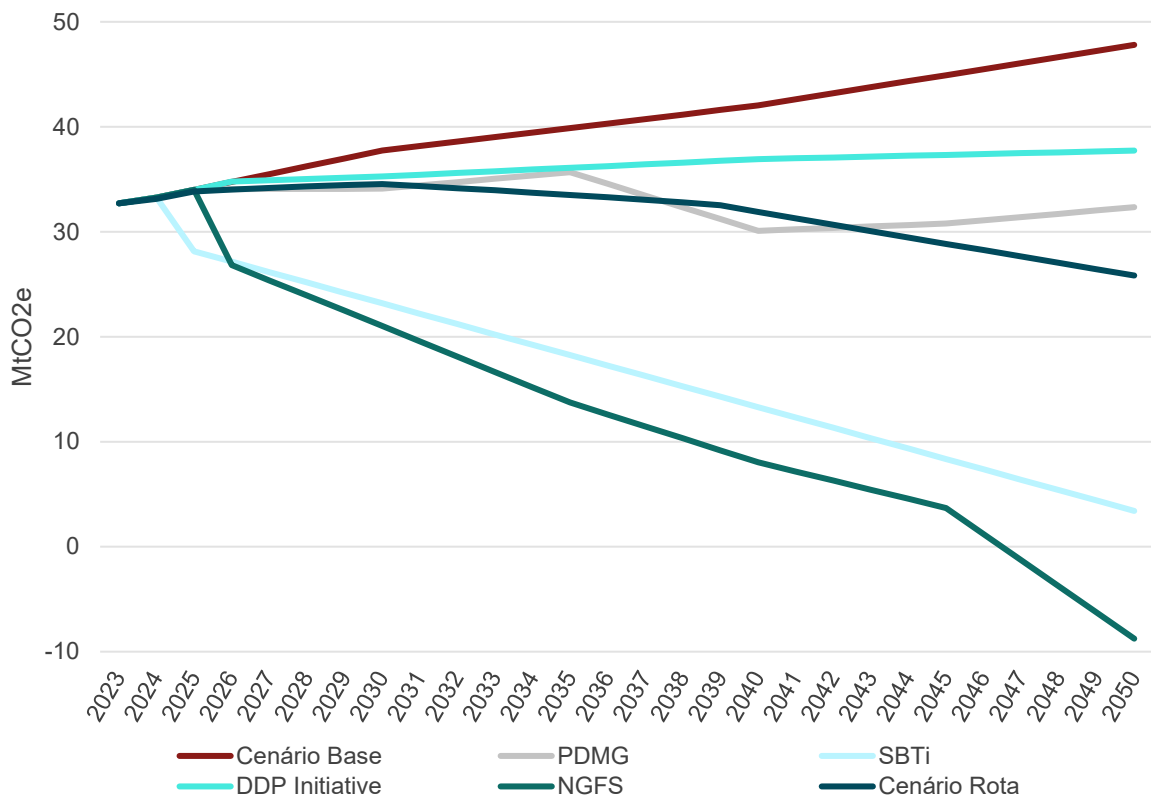
Fonte: Elaboração própria.



Avaliação dos Cenários Base, Net Zero e Rota

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

Figura 18: Trajetória de emissões do Cenário Rota e dos cenários avaliados no produto 2.2



Fonte: Elaboração própria

Enquanto o Cenário Base projeta um aumento de cerca de 46% nas emissões em relação ao ano-base de 2023, o Cenário Rota apresenta uma redução de aproximadamente 21%. Além disso, ao comparar as emissões estimadas para 2050 em ambos os cenários, verifica-se uma redução significativa de cerca de 46% no Cenário Rota.

O Cenário Rota traçado para a indústria tem um índice de redução das emissões inferior quando comparado com as trajetórias de cenários como o Cenário *DDS* da *DDP Initiative* e o Cenário do *PDMG*. Em linhas gerais, é importante ressaltar que os trabalhos foram feitos sob a luz de metodologias e momentos distintos, que resultam em um perfil de emissões diferentes. Entretanto, é possível mapear alguns elementos que podem ajudar a entender os diferentes resultados.

Em relação ao cenário DDS, a diferença observada pode ser atribuída à inclusão de medidas como o uso do hidrogênio, da captura de carbono e da expansão de fontes de energia de baixa emissão. Já as divergências em relação ao PDMG resultam, em grande parte, da revisão das tecnologias consideradas e do mapeamento de seus potenciais de mitigação. Um destaque é a substituição de fontes fósseis por outras de menor intensidade de emissão, como a eletrificação e o uso de biomassa. No Cenário Rota, essas medidas tiveram um papel relevante para redução das emissões no setor industrial, enquanto no PDMG tais medidas não foram contempladas.

Além disso, é importante destacar que as premissas macroeconômicas utilizadas para a projeção da produção industrial também influenciam os resultados dos cenários. O crescimento dos segmentos industriais mais intensivos em emissões pode gerar um efeito de aumento das emissões do setor, mesmo diante da implementação de medidas de mitigação.

Por fim, a discrepância entre as emissões do Cenário Rota e os *benchmarks* externos, acentua-se significativamente quando considerados os cenários mais ambiciosos ou restritivos, como o SBTi e o NGFS. Nesses cenários, as emissões são reduzidas a níveis próximos de zero. Conseqüentemente, ao comparar as emissões do Cenário Rota com esses patamares mínimos, a diferença relativa se torna elevada.

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



CONCLUSÃO

Com base nas análises descritas neste relatório, foi possível elaborar uma projeção para as emissões do setor de indústria de Minas Gerais considerando diferentes cenários. O Cenário Base foi calculado a partir de metodologia *bottom-up*, que descreve matematicamente o perfil de emissões e consumo energético a partir das tecnologias de cada um dos principais segmentos. Em linhas gerais, as premissas utilizadas foram baseadas no nível de atividade da indústria, na matriz energética e nas principais tecnologias de produção. Os resultados mostram que, na ausência de medidas de descarbonização, as emissões de GEE do setor aumentam em 46% em 2050, se comparadas ao ano-base 2023.

Nesse sentido, a avaliação de cenários climáticos permitiu demonstrar o desafio a ser enfrentado pelo setor de indústria para se adequar às trajetórias *Net Zero*, na ambição de limitar o aquecimento global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. Os cenários do PDMG e do DDS mostram que o setor precisará reduzir suas emissões em aproximadamente 23-33% no ano de 2050 em relação ao cenário BAU; mas, em comparação com o ano-base, as emissões desses cenários permanecem praticamente constantes. Por outro lado, os cenários desenvolvidos pelo SBTi e pela NGFS têm metas mais ambiciosas, que garantiriam a descarbonização da indústria sem depender de outros setores.

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

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

Ao analisar a trajetória de emissões do Cenário Rota, constata-se um comportamento oposto ao observado no Cenário Base. Enquanto o Cenário Base projeta um aumento de aproximadamente 46% nas emissões em relação ao ano de 2023, o Cenário Rota apresenta uma redução de cerca de 21%. Em uma análise mais detalhada das emissões estimadas para 2050, verifica-se que o Cenário Rota proporciona uma redução significativa de aproximadamente 46% em relação ao Cenário Base.

Ademais, o Cenário Rota apresenta emissões inferiores em comparação a outros cenários de baixa emissão avaliados. Para comparar esta diferença, podemos ver que no ano de 2050,



as emissões projetadas no Cenário Rota são cerca de 32% inferiores às apresentadas pelo cenário DDS e 20% do cenário PDMG. Esse resultado é um reflexo de perspectivas mais positivas sobre as possibilidades de inserção de medidas como a substituição de combustíveis, que foram pouco avaliadas nos cenários anteriores, e o uso de hidrogênio para o setor de ferro-gusa e aço.

Não sendo o objetivo alcançar totalmente os marcos de redução de emissões previstos nos Cenários *Net Zero* (utilizados primordialmente como referenciais de análise e comparação), o cálculo do Cenário Rota valeu-se de uma metodologia focada em tornar este estudo o mais aderente possível à realidade específica do estado de Minas Gerais, objetivando encontrar um caminho para a neutralidade climática coerente com essa realidade.



CENÁRIOS CONSOLIDADOS

Cenário Base

Metodologia e premissas

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

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

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

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

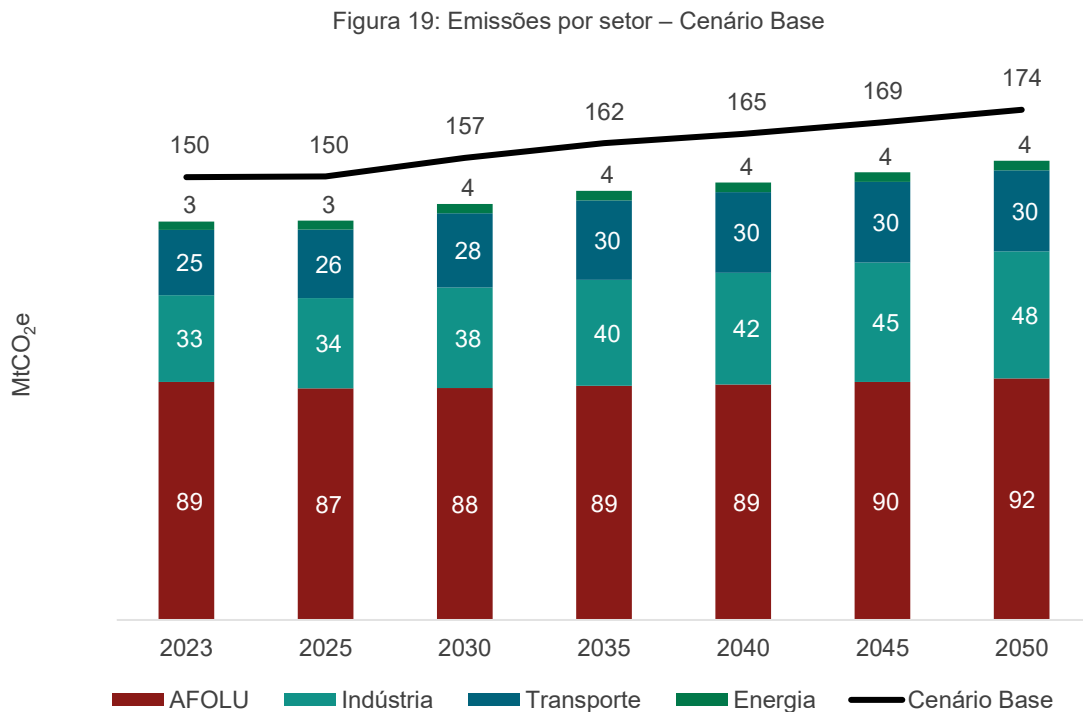


No caso do setor de energia, as emissões foram calculadas a partir da metodologia *top-down*. Para o subsetor de eletricidade, as emissões foram calculadas com base no histórico da geração por fonte e nas projeções de crescimento da geração realizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)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

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

Resultados

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



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

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

No setor de AFOLU, as emissões líquidas²⁶ cresceram 2,45% até 2050, quando comparadas ao ano-base 2023. Esse crescimento não foi tão acentuado devido à contribuição significativa de remoções do subsetor de LULUCF, que representam aproximadamente 22 MtCO₂e, frente aos 114 MtCO₂e de emissões brutas do setor em 2050. Em virtude da projeção do crescimento de suas atividades ao longo do tempo, os subsetores de agricultura e pecuária apresentaram crescimento das emissões líquidas até 2050, cerca de 32,3% e 14,4%, respectivamente, quando comparadas aos valores observados no ano-base 2023.

No setor de energia, as emissões apresentaram um aumento de 15% até 2050 em relação a 2023. Esse crescimento é mais acentuado entre 2023 e 2030, impulsionado principalmente pela expansão das atividades de refino no estado. O subsetor de biocombustíveis registra o maior aumento relativo das emissões. Em 2050, devido ao aumento da produção de etanol e biodiesel, as emissões quase dobram em relação a 2023, passando de 0,23 MtCO₂e para 0,43 MtCO₂e. As emissões relacionadas à geração de eletricidade no estado, por sua vez, apresentam um aumento expressivo, devido ao crescimento da geração termelétrica.

²⁶ Emissões líquidas indicam o saldo entre as emissões e as remoções de GEE. Quando as remoções superam as emissões o saldo é negativo.



Cenário Rota

Metodologia e premissas

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

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

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

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

Resultados

Apesar dos esforços nas aplicações das tecnologias, ao fim do período, o Cenário Rota resulta em uma emissão residual de 36,8 MtCO₂e, o que impede o cumprimento do compromisso *Race to Zero* aderido pelo estado. Embora a meta *Net Zero* não tenha sido alcançada, o Cenário Rota projeta para 2050 uma redução significativa de 75% em relação ao ano-base



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

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

A produção de bioenergia com captura de carbono (BECCS) é atualmente a única tecnologia de remoção de dióxido de carbono que também permite a geração de energia. Ao longo do ciclo de vida da biomassa, as plantas absorvem o CO_2 da atmosfera durante o crescimento, e a tecnologia de BECCS assegura que esse carbono não seja liberado novamente durante o processo de conversão da biomassa em energia (FAJARDY; GREENFIELD, 2024). Essa tecnologia é uma ação conjunta entre os setores de AFOLU (plantio/replanteio) e energia (instalação dos equipamentos). Nesse sentido, regiões com forte vocação para bioenergia, como Minas Gerais, destacando-se pelo seu expressivo setor sucroenergético, apresentam alto potencial para a implementação de projetos de BECCS. Trata-se de uma tecnologia amplamente promovida em diversos planos globais de descarbonização, como o *Roadmap* para o *Net Zero* global do setor de energia (IEA, 2021).

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

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

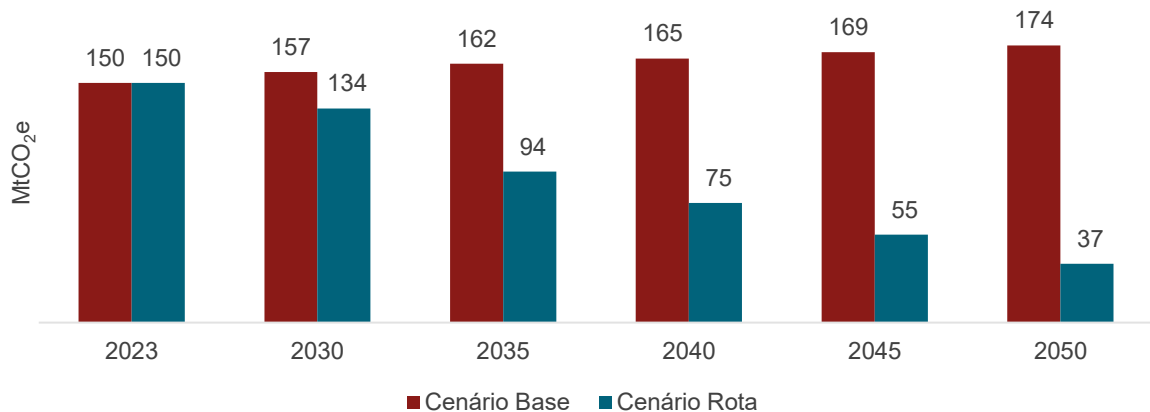
Por fim, o setor de indústria apresenta uma redução de emissões menos expressiva em comparação com os demais setores, atingindo 21% em relação ao ano-base. Isso se deve a alguns fatores característicos do setor: primeiramente, a indústria brasileira tem um alto nível de renovabilidade na matriz energética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



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

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

Figura 20: Emissões totais – Cenários Base e Rota



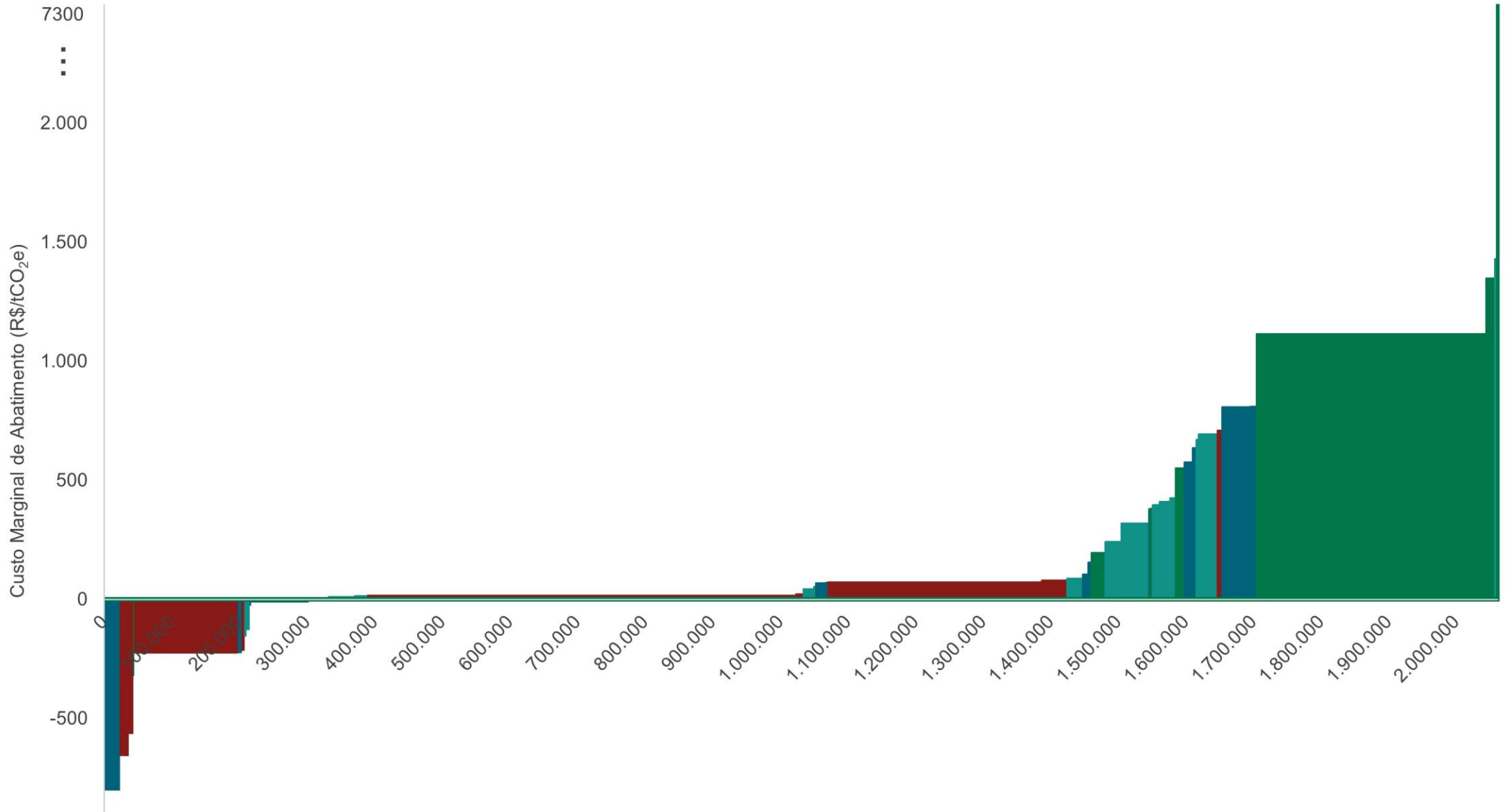
Fonte: Elaboração própria.

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

A Figura 21 apresenta o resultado consolidado da MACC. Nota-se que todos os setores possuem tecnologias com custos marginais de abatimento positivos e negativos. No setor de energia, apenas uma tecnologia apresentou custo marginal de abatimento negativo e, de um modo geral, o setor apresenta os custos mais elevados. As tecnologias propostas para esse setor estão, em sua maioria, associadas à introdução de novos equipamentos na fronteira tecnológica, como captura de carbono e plantas de biometano. Apesar do custo elevado, o setor demonstra um potencial expressivo de abatimento de emissões, apresentando remoções de CO₂ como resultado.



Figura 21: Curva MAC – Cenário Rota



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

Fonte: Elaboração própria.



INVEST
MINAS

WV CARBON

Cenário Rota+

Metodologia e premissas

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

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

Setor de transporte

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

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

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

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

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

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

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

Setor de indústria

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

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



Nesse sentido, o Cenário Rota+ intensificou a aplicação das tecnologias com alto potencial de mitigação e espaço para crescimento, contribuindo para uma redução adicional de 17 MtCO₂e em 2050, o que resultou na descarbonização do setor em um nível de 73% em relação ao ano-base 2023.

No Cenário Rota+, a tecnologia de hidrogênio assumiu um papel mais relevante. Enquanto no Cenário Rota a redução direta com hidrogênio foi responsável por mitigar 16 MtCO₂e no período, no cenário mais ambicioso, esse valor foi ampliado para 55 MtCO₂e, cerca de 3 vezes maior. O uso de captura de carbono (CCS, na sigla em inglês) também teve um papel relevante, contribuindo com o abatimento de 61 MtCO₂e no Cenário Rota+, um valor 4 vezes maior do que foi estimado no Cenário Rota. Além dessas medidas, a substituição de combustíveis foi ampliada nos demais segmentos industriais, refletindo o esforço adicional para que o setor contribua de forma efetiva para o atingimento do *Net Zero*, no âmbito do compromisso *Race to Zero*.

Esse esforço adicional amplia os desafios que a indústria de Minas Gerais deverá enfrentar. Em primeiro lugar, os investimentos necessários serão mais elevados, uma vez que o setor passará a depender mais de tecnologias com alto custo, como a redução direta com hidrogênio (411 R\$/tCO₂e) e CCS (que varia entre 281,31 e 1.891 R\$/tCO₂e, dependendo do subsetor). Ademais dos investimentos diretos nas tecnologias, ambas requerem uma infraestrutura de transporte complexa que deverá ser desenvolvida para viabilizar seu uso pelo setor. De igual modo, é importante destacar que essas são tecnologias ainda estão em processo de desenvolvimento, o que destaca o papel central de investimento em pesquisa para torná-las viáveis e disponíveis para o setor atingir seus compromissos climáticos.

Setor de AFOLU

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

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



Uma vez que algumas tecnologias ainda apresentavam um potencial para crescimento, sua aplicação foi intensificada no Cenário Rota+, para que, em alinhamento aos demais setores, se alcançasse a descarbonização necessária para o atingimento do *Net Zero* de Minas Gerais. Esse esforço resultou em uma redução adicional de 15,1 MtCO₂e em 2050, elevando a descarbonização ao patamar de 96,5% em relação às emissões líquidas do ano-base 2023.

Assim como no Cenário Rota, no Cenário Rota+, a restauração florestal e o combate ao desmatamento foram as soluções responsáveis por reduzir grande parte das emissões totais do setor de AFOLU em 2050, sendo responsáveis por cerca de 60% em relação ao ano-base. Essas duas medidas se consagraram como as principais alavancas para a descarbonização do setor, a um custo de 75,1 R\$/tCO₂e e 6,7 R\$/tCO₂e, respectivamente. Adicional, as tecnologias de sistemas integrados ILP e ILPF, intensificação da pecuária e manejo nutricional e melhoramento genético de bovinos também apresentaram reduções expressivas nas emissões, contribuindo com o resultado do Cenário Rota+.

Esse desempenho foi alcançado por meio da restauração de 1,5 vez mais hectares de pastagens degradadas do que o previsto com o Plano ABC+ MG, de forma a restaurar todo o passivo ambiental atual de mais de 3 milhões de hectares em imóveis rurais. Com relação ao desmatamento, a estratégia adotada para o Cenário Rota+ foi a erradicação do desmatamento em Minas Gerais em todos os biomas, independentemente de sua legalidade, diferentemente do Cenário Rota, no qual foi avaliado a erradicação exclusivamente do desmatamento ilegal. Essa abordagem parte da premissa de uma agropecuária mais intensiva e inovadora no futuro, que propiciará a expansão de produção por meio de uma maior produtividade, sem a necessidade de abertura de novas áreas. Sendo assim, a estratégia do Cenário Rota+ está em linha com os compromissos nacionais, visto que, segundo a publicação do Observatório do Clima (2024) sobre a NDC brasileira, erradicar o desmatamento²⁷, ilegal e legal, é essencial para alcançar a meta de limitar o aquecimento global em 1,5 °C.

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

Setor de energia

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

²⁷ O Observatório do Clima (2024) propõe o fim do desmatamento no Brasil, mas ressalta que ainda seria possível uma supressão residual de vegetação nativa no país de, no máximo, 1.000 quilômetros quadrados ao ano por intervenções de interesse social ou de utilidade pública, declinando ainda mais após 2035.



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

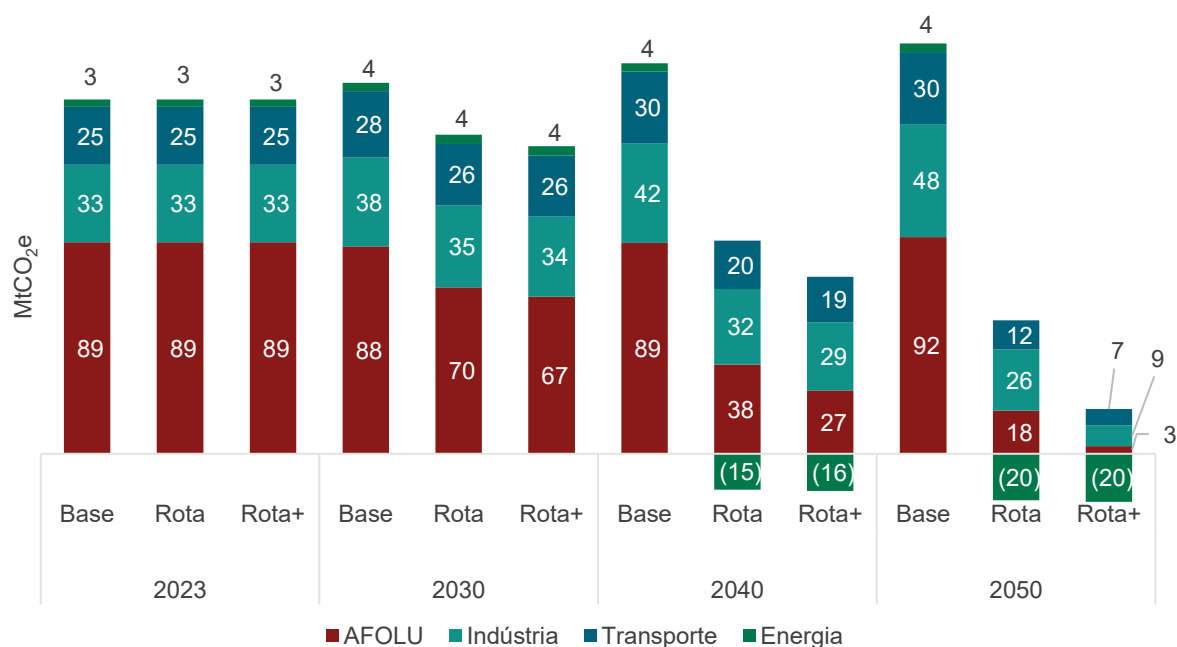
Ainda assim, foi identificada uma possibilidade de aumento no uso de biometano. No Cenário Rota, esse combustível foi destinado à descarbonização da indústria, do transporte e da refinaria de petróleo Refinaria Gabriel Passos (Regap). Entretanto, observou-se que a quantidade de biometano produzido em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

Resultados

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



Figura 22: Emissões por cenário e setor



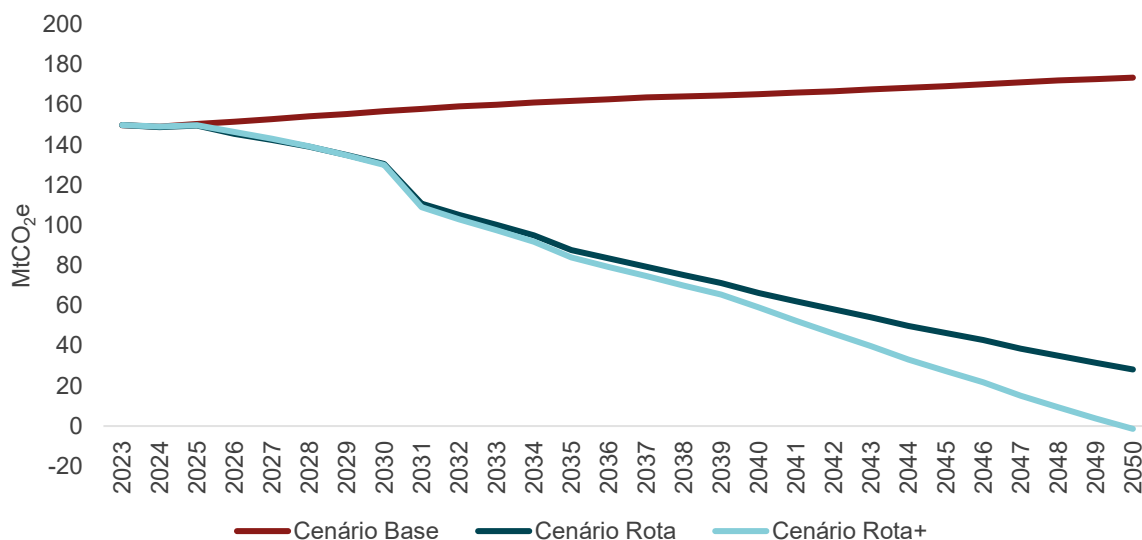
Fonte: Elaboração própria.

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



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

Figura 23: Emissões totais por cenário



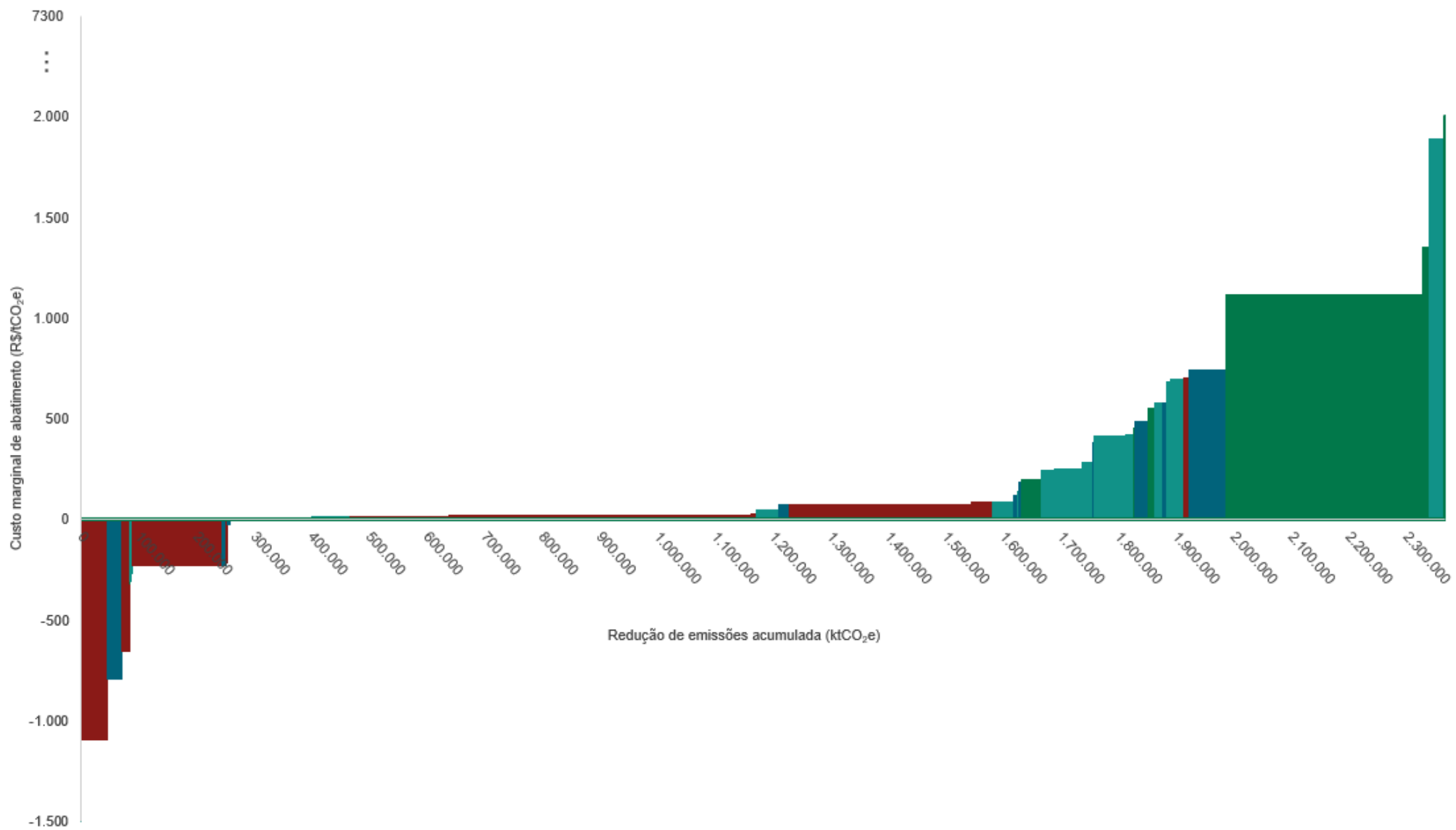
Fonte: Elaboração própria.

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

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



Figura 24: Curva MAC – Cenário Rota+



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

Fonte: Elaboração própria.



INVEST
MINAS

WAY
CARBON

A Tabela 12 apresenta a variação, entre os cenários, na aplicação das tecnologias, no custo marginal de abatimento, no VPL e na redução de emissões.

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

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

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

Tabela 12: Comparação das tecnologias – Cenário Rota e Cenário Rota+

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

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



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



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



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



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



Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Cenário Rota				Cenário Rota +			
		Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO _{2e})	VPL (10 ⁹ R\$)	Mitigação acumulada (MtCO _{2e})	Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO _{2e})	VPL (10 ⁹ R\$)	Mitigação acumulada (MtCO _{2e})
Adições ao clínquer (G1)	Redução da razão clínquer/cimento	30,00	14,00	-0,55	38,67	40,00	11,00	-0,55	51,56
Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) (G3)	Implementação de CCS na produção de cimento	9,00	1.431,00	-6,15	4,30	75,00	1.891,00	-51,26	27,10
Química									
Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como eletricidade e biometano, na indústria química	Eletricidade: 65	673,00	-2,72	4,04	Eletricidade: 70	682,00	-4,64	6,81
		Biometano: 15				Biometano: 25			
Eficiência Energética (G1)	Aumento na eficiência energética da indústria química	12,00	-1.206,00	0,78	0,65	12,00	-2.549,00	0,88	0,35
Mineração									
Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como eletricidade e biometano, na mineração	Eletricidade: 60	426,00	-3,31	7,77	Eletricidade: 60	578,00	-7,15	12,36
		Biometano: 7				Biometano: 18			
Eficiência energética (G1)	Aumento na eficiência energética da mineração	10,00	-154,00	0,39	2,51	10,00	-266,00	0,54	2,04
Outras Indústrias									
Substituição de combustíveis (G2)	Aumento do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como eletricidade, lenha e	Eletricidade: 45	321,00	-13,20	41,15	Eletricidade: 43	248,00	-11,54	46,49
		Lenha: 17				Lenha: 20			



Tecnologia e Grupo (G)	Descrição	Cenário Rota				Cenário Rota +			
		Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO ₂ e)	VPL (10 ⁹ R\$)	Mitigação acumulada (MtCO ₂ e)	Premissa considerada (%)	Custo marginal de abatimento (BRL/ tCO ₂ e)	VPL (10 ⁹ R\$)	Mitigação acumulada (MtCO ₂ e)
	biometano, na produção de outras indústrias	Biometano: 4				Biometano: 8			
Eficiência energética (G1)	Aumento na eficiência energética da produção de outras indústrias	8,00	56,00	-0,17	3,09	8,00	136,00	-0,36	2,66
Captura e Armazenamento de Carbono (CCS)	Implementação de CCS na produção de outras indústrias	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	75,00	281,00	-5,28	18,76
ENERGIA									
Eletricidade (G1)									
Expansão da geração hidrelétrica – Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR)2	Aumento da geração hidrelétrica por UHR, substituindo usinas térmicas fósseis	73	7.262,00	-15,61	2,15	73,00	7.262,00	-15,61	2,15
Implementação de sistemas de armazenamento de energia em bateria em alta tensão – BESS2	Armazenamento de energia em baterias em larga escala, substituindo térmicas fósseis e compensando a intermitência das fontes renováveis	27	2.000,00	-1,29	0,65	27,00	2.000,00	-1,29	0,65
Refino de petróleo (G2)									
Medidas de eficiência energética	Implementação de medidas de eficiência energética nas seguintes unidades da Regap: UDA, FCC e UCR	100	2,70	-0,01	2,74	100	2,70	-0,01	2,74
Gás natural em substituição do óleo combustível	Substituição do óleo combustível utilizado na Regap para o gás natural	100	1.349,00	-17,95	13,30	100,00	1.349,01	-17,95	13,30



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

Fonte: Elaboração própria.



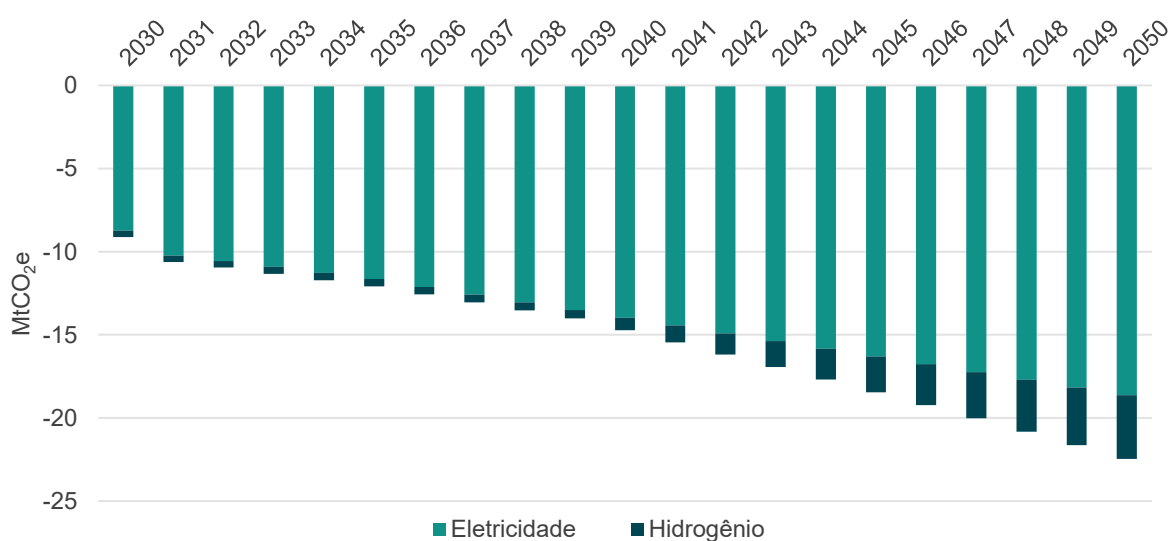
Emissões evitadas

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

Em Minas Gerais, as emissões evitadas concentram-se no setor de energia, especificamente na geração de eletricidade e produção de hidrogênio. No caso da eletricidade, existe um potencial de geração fotovoltaica acima da demanda, o que evitaria 18,7 MtCO₂e em 2050 (Figura 25). Essa oferta elevada de eletricidade de fonte renovável também auxilia na produção em larga escala de hidrogênio verde no estado.

Os avanços recentes do setor no estado, como a expansão da fábrica da empresa alemã Neuman & Esser (SEDE, 2024), contribuem para a redução dos custos de eletrolisadores, que atualmente chegam a mais de 8 mil R\$/kW (BHANDARI, 2025), tornando essa opção mais custo efetiva. Dessa forma, adicionalmente a atender à demanda futura dos setores de transporte e indústria, o estado ainda teria a oportunidade de exportar hidrogênio para outras regiões do país, totalizando uma redução de aproximadamente 3,8 MtCO₂e (Figura 25)

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



Fonte: Elaboração própria.



Considerações finais

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

Apesar do déficit observado entre a oferta e a demanda na maioria dos biocombustíveis, o cenário é inverso quando se trata da geração de eletricidade. Mesmo diante do aumento da demanda impulsionada pela eletrificação nos setores de transporte e energia, Minas Gerais é capaz de ofertar excedente para os outros estados, contribuindo para a descarbonização dos demais estados brasileiros, que passam a ter disponível uma energia elétrica com menor fator de emissão associado. As emissões evitadas pelo estado em 2050 chegam a 22,5 MtCO₂e.

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



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



**INVEST
MINAS**

WVCARBON

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AGORA INDUSTRY; WUPPERTAL INSTITUTE; LUND UNIVERSITY. **Low-carbon technologies for the global steel transformation. A guide to the most effective ways to cut emissions in steelmaking**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.agora-industry.org/publications/low-carbon-technologies-for-the-global-steel-transformation>. Acesso em: 6 fev. 2024.

ANTAQ. **Diagnóstico de descarbonização, infraestrutura e aplicações do hidrogênio nos Portos**. GIZ/ANTAQ/MPOR/BRASIL, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/antag/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antag-1/GIZAL23A_240429_P6_Guia_de_Recomendacoes_V8.0.pdf. Acesso em: 23 abr. 2025.

ARENS, M.; WORRELL, E.; SCHLEICH, J. Energy intensity development of the German iron and steel industry between 1991 and 2007. **Energy**, v. 45, n. 1, p. 786–797, 2012.

ARNABOLDI, M., AZZONE, G., GIORGINO, M. Long- and Short-Term Decision Making. *In: Performance Measurement and Management for Engineers*, 95–103. 2015. doi:10.1016/b978-0-12-801902-3.00007-4.

BHANDARI, Ramchandra. Standalone electricity supply system with solar hydrogen and fuel cell: Possible to get rid of storage batteries? **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 104, p. 599–610, fev. 2025. DOI 10.1016/j.ijhydene.2024.08.037. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319924031872>. Acesso em: 24 abr. 2025.

BOSTON METAL selected as 2021 S&P Global Platts Global Metals Awards finalist. **Boston Metal**, [S. l.], 26 de maio de 2021. Disponível em: <https://www.bostonmetal.com/news/boston-metal-selected-as-2021-sp-global-platts-global-metals-awards-finalist>. Acesso em: 06 maio 2025.

BRASIL. **IV Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: setor de processos industriais e uso de produtos**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 30 dez. 2024.

BRASIL. **Opções de Mitigação de Emissões de GEE em Setores-Chave**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/opcoes-de-mitigacao-de-emissoes-de-gee-em-setores-chave>. Acesso em: 30 dez. 2024

BRASIL. Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, seq. 1, 22 dez. 2006. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm. Acesso em: 13 maio 2025.



BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. **Diário Oficial da União**, seq. 1, 28 maio 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 13 maio 2025.

BRASIL. **Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Bioma Cerrado – PPCerrado**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2010. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biomas/cerrado/ppcerrado>. Acesso em: 13 maio 2025.

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

DDP INITIATIVE. **Brazil pathways for Industry sector**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://ddpinitiative.org/ind-biics-data/>. Acesso em: 20 set. 2024.

DE OLIVEIRA, L.P.N. Modelagem de custos de abatimento e de curvas de aprendizagem tecnológica. indústria. *In: Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil*, 2015. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/proje_to_opcoes_mitigacao/modelagem_abatimento_aprend_tecnologico/custo_abat_apren_tecn_industrial.pdf. Acesso em: 14 mar. 2025.

ELEMENT ENERGY. **Industrial Fuel Switching Market Engagement Study**. 2018. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5d51400bed915d718d63b558/industrial-fuel-switching.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2025.

EPE. **Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selecionados: Projeto META – Projeto de Assistência Técnica dos Setores de Energia e Mineral**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2018a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/projeto-de-assistencia-tecnica-dos-setores-de-energia-e-mineral-projeto-meta>. Acesso em: 27 fev. 2025.

EPE. **Balanço de Energia Útil para segmentos selecionados da Indústria**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2018b.

EPE. **Captura, armazenamento e utilização de carbono no brasil**: contribuições para a seleção de áreas de interesse. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/captura-armazenamento-e-utilizacao-de-carbono-no-brasil-contribuicoes-para-a-selecao-de-areas-de-interesse>. Acesso em: 14 mai. 2025.

EPE. **Hidrogênio azul**: produção a partir da reforma do gás natural com CCUS. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2022. Nota Técnica nº 2/2022 – EPE/DPG/SPG. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/notas-tecnicas-dedicadas-ao-hidrogenio-cinza-e-ao-hidrogenio-azul>. Acesso em: 14 maio 2025.



EUROFER. A Steel Roadmap for A Low Carbon Europe. Bruxelas: Eurofer. [s. d.]. Disponível em: http://www.nocarbonnation.net/docs/roadmaps/2013-Steel_Roadmap.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025

FAJARDY, Mathilde; GREENFIELD, Carl. **Bioenergy with Carbon Capture and Storage**. [S. l.]: IEA, 25 abr. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>. Acesso em: 1 jan. 2025.

GARDARSDOTTIR, S. O. *et al.* Comparison of Technologies for CO₂ Capture from Cement Production – Part 2: Cost Analysis. **Energies**, v. 12, n. 3, p. 542, 1º jan. 2019.

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

HASANBEIGI, A. *et al.* A bottom-up model to estimate the energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Chinese iron and steel industry. **Energy**, v. 50, n. 1, p. 315–325, 2013.

HASANBEIGI, A.; MENKE, C.; PRICE, L. The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 15, p. 1.509–1.518, 2010.

HEBEDA, O. **Análise das Alternativas para a Descarbonização da Indústria Brasileira a partir de um Modelo de Otimização**. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

IEA. **Iron and Steel Technology Roadmap: Energy Technology Perspectives**. Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. Acesso em: 17 maio 2025.

IEA, International Energy Agency. **Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>. Acesso em: 27 maio 2025.

IEA, International Energy Agency. **Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector**. [S. l.]: IEA, 2021. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf. Acesso em: 1 jan. 2025

IEMA. Instituto de Energia e Meio Ambiente. **Estudo Econômico do Custo de Energia a partir de Madeira de Plantios de Eucalipto**. São Paulo: IEMA, 2017. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2017/01/IEMA_353874-17_CustoEnergia_VersaCC83o_IEMA_Final_2017_11_16.pdf. Acesso em: 27 fev. 2025

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

IPCC. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**. In: EGGLESTON, H. S. *et al.* (eds). Japan: IGES, 2006.



LABORATÓRIO CENERGIA/PPE/COPPE/UFRJ. **Plano de descarbonização para o Estado de Minas Gerais dentro de um Brasil clima neutro em 2050**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2023/09/plano-descarbonizacao-minasgerais-coppe-ppe-feam.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2024.

LEE, H-G. *et. al.* Recent Development of Finex® Process. *In: 42º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas / 13º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro / 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking*, p. 2.897–2.904, Rio de Janeiro, 2012. ISSN: 2594-357X, DOI 10.5151/2594-357X-22770.

MEIJER, K. *et. al.* The Hlsarna Ironmaking process. *In: 42º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas / 13º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro / 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking*, p. 2.840–2.846. Rio de Janeiro, 2012. ISSN: 2594-357X, DOI 10.5151/2594-357X-22715.

MORROW, W. R. *et al.* Assessment of energy efficiency improvement and CO2 emission reduction potentials in India's cement and iron & steel industries. *Journal of Cleaner Production*, v. 65, p. 131–141, 2014.

NGFS. **NGFS Scenarios for central banks and supervisors**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.ngfs.net/en/publications-and-statistics/publications/ngfs-climate-scenarios-central-banks-and-supervisors>. Acesso em: 20 set. 2024.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **SEEG – Sistema de Estimativa de Emissão de Gases**. Piracicaba: Observatório do Clima, 2024. Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br>. Acesso em: 20 set. 2024.

OTTO, A. *et al.* Power-to-steel: Reducing CO2 through the integration of renewable energy and hydrogen into the German steel industry. **Energies**, v. 10, n. 4, 2017.

PINTO, R. G. D.; SZKLO, A. S.; RATHMANN, R. CO2 emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector—From structural to intensity effects. **Energy Policy**, [s. l.], v. 114, p. 380–393, 2018.

SBTi. Science Based Targets Initiative. **SBTi Corporate Net-Zero Standard Criteria**. 2024. Disponível em: <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/Net-Zero-Standard-Criteria.pdf>. Acesso em: 20 set. 2024

SBTi. **FUNDAMENTOS PARA O ESTABELECIMENTO DE METAS CORPORATIVAS DE EMISSÕES LÍQUIDAS-ZERO BASEADAS NA CIÊNCIA**. [S. l.: s. n.], set. 2020a. Disponível em: https://sciencebasedtargets.org/resources/files/Net-Zero_Full-Paper_Brazilian-Portuguese.pdf. Acesso em: 5 maio 2025.

SEDE, SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. Energia do futuro: Minas Gerais atrai quase R\$ 4 bilhões em investimentos em fontes alternativas. 2024. **SEDE - SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO**. 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: 17 abr. 2025.



SINDIFER, Sindicato da Indústria de Ferro no Estado de Minas Gerais. Anuário Estatístico: produção de ferro-gusa em Minas Gerais e no Brasil. Belo Horizonte: SINDIFER, 2024. Disponível em: <https://sindifer.com.br/sndfr/anuario-estatistico/>. Acesso em: 14 mar. 2025

SNIC. **Números**: dados do setor. São Paulo: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2024

SOLAR PAYBACK. **Energia Termossolar para a Indústria**: Brasil. [S. l.]: Solar Payback, 2018. Disponível em: https://www.solar-payback.com/wp-content/uploads/2018/08/SHIPBrasil-PT2018_FINAL.pdf. Acesso em: 3 maio 2025.

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

TECNORED. **Sustainability**. Disponível em: <https://www.tecnored.com.br/en/sustainability/>. Acesso em: 30 abr. 2025.

THIEL, G. P.; STARK, A. K. To decarbonize industry, we must decarbonize heat. **Joule**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 531–550, 2021.

VAN RUIJVEN, B. J. *et al.* Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 112, p. 15–36, 2016.

VOGL, V.; ÅHMAN, M.; NILSSON, L. J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 736–745, 2018.

VOLDSUND, M. *et al.* Comparison of Technologies for CO₂ Capture from Cement Production—Part 1: Technical Evaluation. **Energies**, v. 12, n. 3, p. 559, 1º jan. 2019.

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

WBCSD. **Guidance on Avoided Emissions: helping business drive innovations and scale solutions toward Net Zero**. 2023. Disponível em: <https://www.wbcd.org/Imperatives/Climate-Action/Resources/Guidance-on-Avoided-Emissions>. Acesso em: 6 mar. 2025.

WEST, K. J.; DE JONGE, J. J.; VAN HOUT, M. **Decarbonisation Options for the Dutch Potato Processing Industry**. PBL Netherlands Environmental Agency, Manufacturing Industry Decarbonisation Data Exchange Network, 2021. Disponível em: https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2021-decarbonisation-options-for-the-dutch-potato-products-industry_3658.pdf. Acesso em: 27 fev. 2025.

WORLD BANK. **Finance Concepts for Investment Decisions**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/197501544810224462-0090022018/related/Session050Basi11lity0Finance0160413.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2025.



XU, J. H.; YI, B. W.; FAN, Y. A. Bottom-up optimization model for long-term CO₂ emissions reduction pathway in the cement industry: A case study of China. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 44, p. 199–216, 2016.

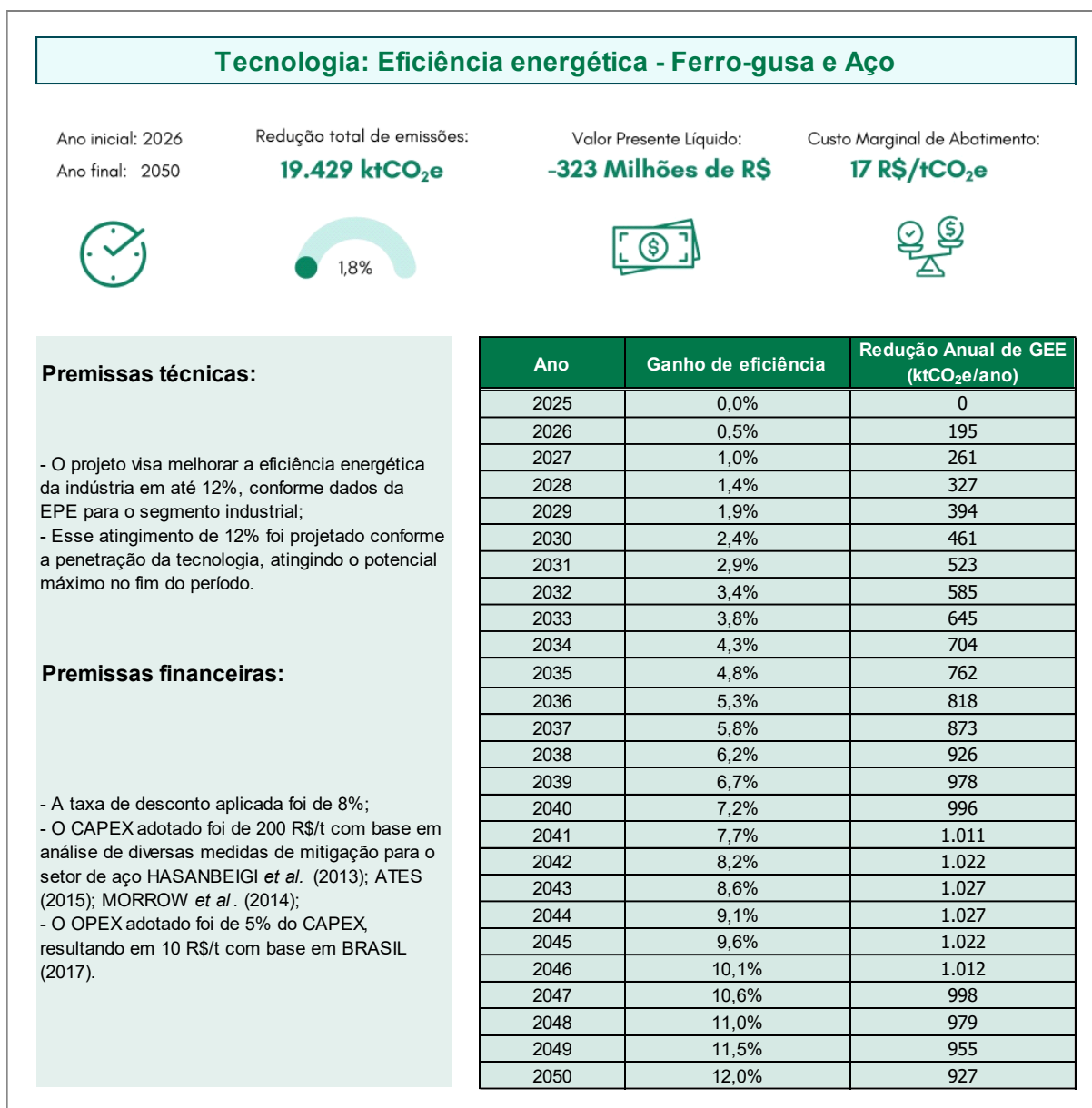
ZUBERI, M. J. S.; PATEL, M. K. Bottom-up analysis of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Swiss cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 4294–4309, 2017.



ANEXO

Fichas técnicas

Grupo 1: Eficiência energética



Tecnologia: Eficiência energética - Ferroligas

Ano inicial: 2026

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

155 ktCO₂e

-15 Milhões de R\$

96 R\$/tCO₂e



Premissas técnicas:

- O projeto visa melhorar a eficiência energética da indústria em até 8%, conforme o potencial do setor de acordo com EPE (2018);
- Esse atingimento de 8% foi projetado conforme a penetração da tecnologia, atingindo o potencial máximo no fim do período.

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 3.000.000 R\$/ktep com base em BRASIL (2017); ZUBERI, M. J. S., & PATEL, M. K. (2017);
- O OPEX adotado foi de 5% do CAPEX, resultando em 150.000 R\$/ktep com base em BRASIL (2017); ZUBERI, M. J. S., & PATEL, M. K. (2017);
- A economia de combustível foi feita considerando a diferença de consumo entre anos subsequentes, com base nos preços vigentes em 2024.

Ano	Ganho de eficiência	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	0,0%	0
2026	0,3%	697
2027	0,6%	1.379
2028	1,0%	2.044
2029	1,3%	2.691
2030	1,6%	3.318
2031	1,9%	3.887
2032	2,2%	4.425
2033	2,6%	4.930
2034	2,9%	5.404
2035	3,2%	5.845
2036	3,5%	6.253
2037	3,8%	6.630
2038	4,2%	6.974
2039	4,5%	7.285
2040	4,8%	7.564
2041	5,1%	7.849
2042	5,4%	8.103
2043	5,8%	8.324
2044	6,1%	8.514
2045	6,4%	8.670
2046	6,7%	8.793
2047	7,0%	8.882
2048	7,4%	8.936
2049	7,7%	8.956
2050	8,0%	9.111



Tecnologia: Eficiência energética - Cimento

Ano inicial: 2026

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

4.944 ktCO₂e

634 Milhões de R\$

-128 R\$/tCO₂e



Premissas técnicas:

- O projeto visa melhorar a eficiência energética da indústria em até 9%, conforme a média das tecnologias e de ganhos de eficiência na ordem de 218 MJ/t de cimento. Cerca de 9,3% do valor de 2025;
- Esse atingimento de 9% foi projetado conforme a penetração da tecnologia, atingindo o potencial máximo no fim do período.

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 3,234 R\$/t cimento com base em HASANBEIGI *et al.* (2013); HASANBEIGI, MENKE, PRICE (2010); MORROW *et al.* (2014); XU, YI, FAN (2016); ZUBERI, PATEL (2017);
- O OPEX adotado foi de 5% do CAPEX, resultando em 0,16 R\$/t cimento com base em HASANBEIGI *et al.* (2013); MORROW *et al.* (2014);
- A economia de combustível foi feita considerando a diferença de consumo entre anos subsequentes, com base nos preços vigentes em 2024.

Ano	Ganho de eficiência	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	0,0%	0
2026	0,4%	19
2027	0,7%	38
2028	1,1%	57
2029	1,5%	76
2030	1,9%	94
2031	2,2%	111
2032	2,6%	127
2033	3,0%	142
2034	3,3%	157
2035	3,7%	172
2036	4,1%	185
2037	4,5%	199
2038	4,8%	211
2039	5,2%	223
2040	5,6%	234
2041	6,0%	246
2042	6,3%	257
2043	6,7%	268
2044	7,1%	278
2045	7,4%	288
2046	7,8%	296
2047	8,2%	305
2048	8,6%	312
2049	8,9%	319
2050	9,3%	331



Tecnologia: Aditivo ao clínquer - Cimento

Ano inicial: 2026

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

38.673 ktCO₂e**-546 Milhões de R\$****14 R\$/tCO₂e**

Premissas técnicas:

- O projeto visa reduzir a relação clínquer cimento em até 30%;
- Esse atingimento foi projetado conforme a penetração da tecnologia, atingindo o potencial máximo no fim do período.

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 5 R\$/t cimento com base em HASANBEIGI *et al.* (2013); HASANBEIGI, MENKE, PRICE (2010); MORROW *et al.* (2014); XU, YI, FAN (2016); ZUBERI, PATEL (2017);
- O OPEX adotado foi de 5% do CAPEX, resultando em 0,25 R\$/t cimento com base em HASANBEIGI *et al.* (2013); MORROW *et al.* (2014).

Ano	Redução da razão clínquer cimento	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	0,0%	0
2026	1,2%	93
2027	2,4%	190
2028	3,6%	291
2029	4,8%	397
2030	6,0%	506
2031	7,2%	615
2032	8,4%	727
2033	9,6%	841
2034	10,8%	957
2035	12,0%	1.077
2036	13,2%	1.198
2037	14,4%	1.323
2038	15,6%	1.450
2039	16,8%	1.579
2040	18,0%	1.711
2041	19,2%	1.856
2042	20,4%	2.005
2043	21,6%	2.158
2044	22,8%	2.314
2045	24,0%	2.474
2046	25,2%	2.639
2047	26,4%	2.807
2048	27,6%	2.979
2049	28,8%	3.154
2050	30,0%	3.334



Tecnologia: Eficiência energética - Química

Ano inicial: 2026

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

649 ktCO₂e

783 Milhões de R\$

-1.206 R\$/tCO₂e



Premissas técnicas:

- O projeto visa melhorar a eficiência energética da indústria em até 12%, conforme a EPE (2018);
- Esse atingimento de 12% foi projetado conforme a penetração da tecnologia, atingindo o potencial máximo no fim do período.

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 3.000.000 R\$/ktep com base em BRASIL (2017); ZUBERI, M. J. S., & PATEL, M. K. (2017);
- O OPEX adotado foi de 5% do CAPEX, resultando em 150.000 R\$/ktep com base em BRASIL (2017); ZUBERI, M. J. S., & PATEL, M. K. (2017);
- A economia de combustível foi feita considerando a diferença de consumo entre anos subsequentes, com base nos preços vigentes em 2024.

Ano	Ganho de eficiência	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	0,0%	0
2026	0,5%	3
2027	1,0%	6
2028	1,4%	8
2029	1,9%	11
2030	2,4%	13
2031	2,9%	15
2032	3,4%	18
2033	3,8%	20
2034	4,3%	22
2035	4,8%	24
2036	5,3%	26
2037	5,8%	27
2038	6,2%	29
2039	6,7%	31
2040	7,2%	32
2041	7,7%	33
2042	8,2%	34
2043	8,6%	35
2044	9,1%	36
2045	9,6%	37
2046	10,1%	37
2047	10,6%	38
2048	11,0%	38
2049	11,5%	38
2050	12,0%	39



Tecnologia: Eficiência energética - Mineração

Ano inicial: 2026

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

2.509 ktCO₂e

387 Milhões de R\$

-154 R\$/tCO₂e



Premissas técnicas:

- O projeto visa melhorar a eficiência energética da indústria em até 10%, conforme a EPE (2018);
- Esse atingimento de 10% foi projetado conforme a penetração da tecnologia, atingindo o potencial máximo no fim do período.

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 3.000.000 R\$/ktep com base em BRASIL (2017); ZUBERI, M. J. S., & PATEL, M. K. (2017);
- O OPEX adotado foi de 5% do CAPEX, resultando em 150.000 R\$/ktep com base em BRASIL (2017); ZUBERI, M. J. S., & PATEL, M. K. (2017);
- A economia de combustível foi feita considerando a diferença de consumo entre anos subsequentes, com base nos preços vigentes em 2024.

Ano	Ganho de eficiência	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	0,0%	0
2026	0,4%	9
2027	0,8%	19
2028	1,2%	28
2029	1,6%	37
2030	2,0%	46
2031	2,4%	55
2032	2,8%	63
2033	3,2%	71
2034	3,6%	79
2035	4,0%	86
2036	4,4%	93
2037	4,8%	100
2038	5,2%	106
2039	5,6%	112
2040	6,0%	118
2041	6,4%	124
2042	6,8%	130
2043	7,2%	136
2044	7,6%	141
2045	8,0%	146
2046	8,4%	151
2047	8,8%	156
2048	9,2%	160
2049	9,6%	164
2050	10,0%	179



Tecnologia: Eficiência energética - Outras indústrias

Ano inicial: 2026

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

3.092 ktCO₂e

-172 Milhões de R\$

56 R\$/tCO₂e



Premissas técnicas:

- O projeto visa melhorar a eficiência energética da indústria em até 8%, conforme potencial do setor de acordo com EPE (2018);
- Esse atingimento de 8% foi projetado conforme a penetração da tecnologia, atingindo o potencial máximo no fim do período.

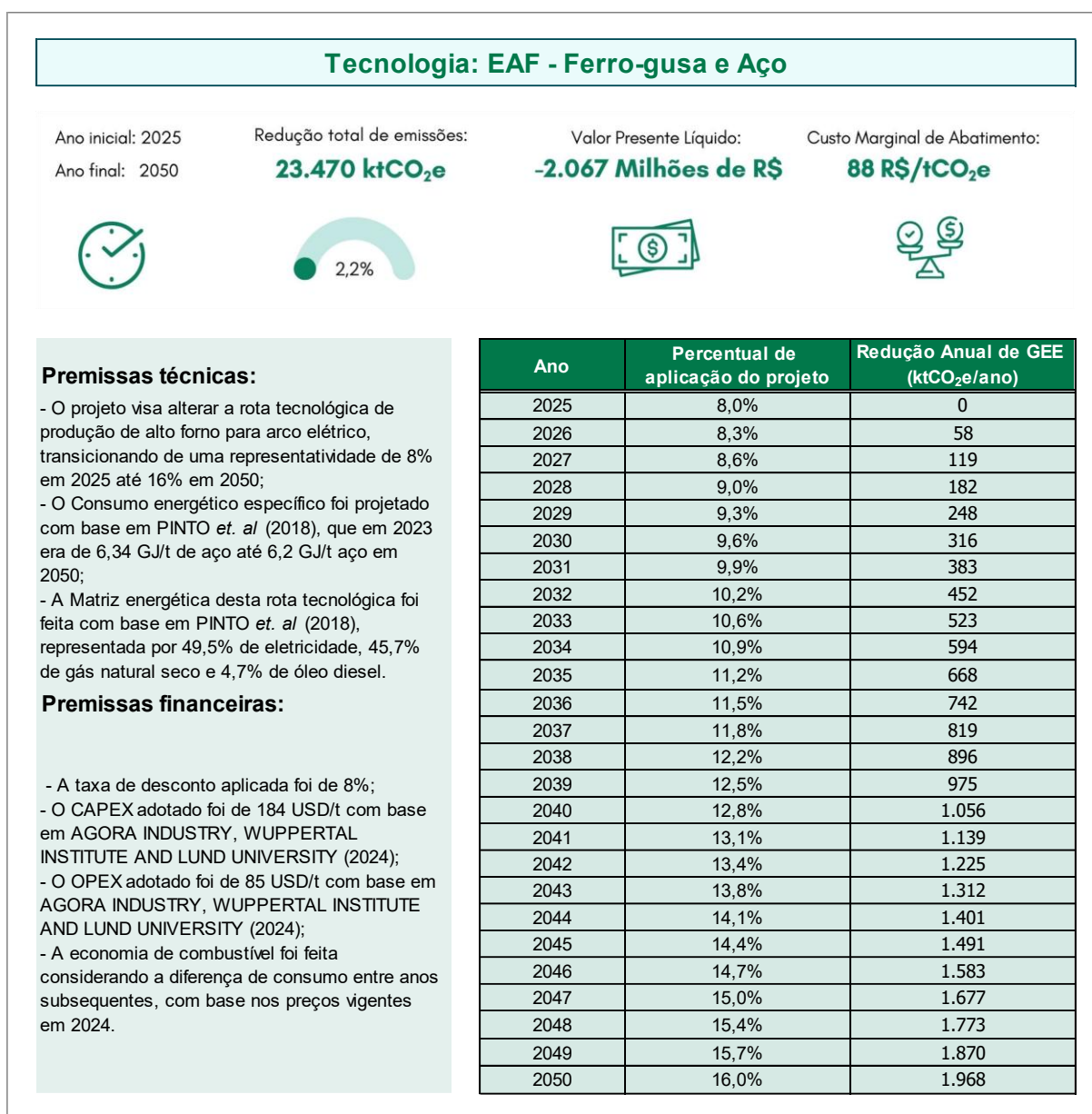
Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 3.000.000 R\$/ktep com base em BRASIL (2017); ZUBERI, M. J. S., & PATEL, M. K. (2017);
- O OPEX adotado foi de 5% do CAPEX, resultando em 150.000 R\$/ktep com base em BRASIL (2017); ZUBERI, M. J. S., & PATEL, M. K. (2017);
- A economia de combustível foi feita considerando a diferença de consumo entre anos subsequentes, com base nos preços vigentes em 2024.

Ano	Ganho de eficiência	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	0,0%	0
2026	0,3%	53
2027	0,6%	69
2028	1,0%	84
2029	1,3%	98
2030	1,6%	111
2031	1,9%	121
2032	2,2%	131
2033	2,6%	139
2034	2,9%	145
2035	3,2%	150
2036	3,5%	154
2037	3,8%	157
2038	4,2%	158
2039	4,5%	158
2040	4,8%	157
2041	5,1%	155
2042	5,4%	151
2043	5,8%	146
2044	6,1%	140
2045	6,4%	132
2046	6,7%	122
2047	7,0%	111
2048	7,4%	98
2049	7,7%	84
2050	8,0%	69



Grupo 2: Substituição de combustíveis e uso de fontes alternativas



Tecnologia: Carvão Vegetal - Ferro-gusa e Aço

Ano inicial: 2025

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

23.453 ktCO₂e**-5.708 Milhões de R\$****243 R\$/tCO₂e**

Premissas técnicas:

- O projeto objetiva a transição do consumo de carvão mineral para carvão vegetal nas indústrias com a rota tecnológica de alto-forno;
- A projeção da matriz energética das indústrias foi feita com base em PINTO *et al.* (2018), que em 2025 representa 75% a carvão mineral, 17% a carvão vegetal e 8% arco elétrico. Em 2050 passou-se a ter a representatividade de 59% a carvão mineral, 25% a carvão vegetal e 16% arco elétrico.

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 184 USD/t com base em ARENS, WORRELL, SCHLEICH (2012); EUROFER (2013); OTTO *et al.* (2017); TECNORED (2021); VAN RUIJVEN *et al.* (2016); VOGL, OLSSON, NYKVIST (2021);
- O OPEX adotado foi de 85 USD/t com base em AGORA INDUSTRY, WUPPERTAL INSTITUTE AND LUND UNIVERSITY (2024);
- A economia de combustível foi feita considerando a diferença de consumo entre anos subsequentes, com base nos preços vigentes em 2024.

Ano	Percentual de aplicação do projeto	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	16,6%	0
2026	16,9%	58
2027	17,2%	119
2028	17,6%	182
2029	17,9%	247
2030	18,2%	315
2031	18,6%	383
2032	18,9%	452
2033	19,3%	522
2034	19,6%	594
2035	19,9%	667
2036	20,3%	742
2037	20,6%	818
2038	20,9%	895
2039	21,3%	974
2040	21,6%	1.055
2041	22,0%	1.139
2042	22,3%	1.224
2043	22,6%	1.311
2044	23,0%	1.400
2045	23,3%	1.490
2046	23,6%	1.582
2047	24,0%	1.676
2048	24,3%	1.771
2049	24,7%	1.868
2050	25,0%	1.967



Tecnologia: Substituição de combustíveis fósseis - Ferroligas

Ano inicial: 2025

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

978 ktCO₂e**-21 Milhões de R\$****22 R\$/tCO₂e**

Premissas técnicas:

- O projeto visa a transição de combustíveis fósseis para combustíveis alternativos, nesse caso, biomassa, eletricidade e biometano atingindo a representatividade de 54,8%, 20% e 5%, respectivamente até 2050;
- A projeção da matriz foi feita com base em SEEG (2023) e COPPE-UFRJ/UFGM/USP (2022).

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 5.815.000 R\$/ktep com base em WEST *et al.* (2021); IEMA (2017); ELEMENT ENERGY (2018);
- O OPEX adotado foi de 5% do CAPEX, resultando em 290.750 R\$/ktep com base em WEST *et al.* (2021); IEMA (2017); ELEMENT ENERGY (2018).

Ano	Consumo de Biomassa	Consumo de eletricidade	Consumo de biometano	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	47,4%	8,9%	0,0%	0
2026	47,7%	9,4%	0,2%	195
2027	48,0%	9,8%	0,4%	261
2028	48,3%	10,3%	0,6%	327
2029	48,6%	10,7%	0,8%	394
2030	48,9%	11,1%	1,0%	461
2031	49,2%	11,6%	1,2%	523
2032	49,5%	12,0%	1,4%	585
2033	49,8%	12,5%	1,6%	645
2034	50,1%	12,9%	1,8%	704
2035	50,4%	13,4%	2,0%	762
2036	50,7%	13,8%	2,2%	818
2037	51,0%	14,2%	2,4%	873
2038	51,3%	14,7%	2,6%	926
2039	51,6%	15,1%	2,8%	978
2040	51,8%	15,6%	3,0%	996
2041	52,1%	16,0%	3,2%	1.011
2042	52,4%	16,5%	3,4%	1.022
2043	52,7%	16,9%	3,6%	1.027
2044	53,0%	17,3%	3,8%	1.027
2045	53,3%	17,8%	4,0%	1.022
2046	53,6%	18,2%	4,2%	1.012
2047	53,9%	18,7%	4,4%	998
2048	54,2%	19,1%	4,6%	979
2049	54,5%	19,6%	4,8%	955
2050	54,8%	20,0%	5,0%	927



Tecnologia: Substituição de combustíveis fósseis - Cimento

Ano inicial: 2026

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

15.442 ktCO₂e

-707 Milhões de R\$

46 R\$/tCO₂e



Premissas técnicas:

- O projeto visa a transição de combustíveis fósseis para combustíveis alternativos, nesse caso, carvão vegetal e outras biomassas, atingindo a representatividade, em 2050, de 25% e 30%, respectivamente;
- A projeção da matriz foi feita com base em SEEG (2023) e COPPE-UFRJ/UFMG/USP (2022).

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 16 R\$/t cimento com base em HASANBEIGI *et al.* (2013); HASANBEIGI, MENKE, PRICE (2010); MORROW *et al.* (2014); XU, YI, FAN (2016); ZUBERI, PATEL (2017);
- O OPEX adotado foi de 5% do CAPEX, resultando em 0,81 R\$/t cimento com base em HASANBEIGI *et al.* (2013); HASANBEIGI, MENKE, PRICE (2010); MORROW *et al.* (2014); XU, YI, FAN (2016); ZUBERI, PATEL (2017);
- Os gastos de consumo de combustível foi feita considerando a diferença de consumo entre anos subsequentes, com base nos preços vigentes em 2024.

Ano	Consumo de carvão vegetal	Consumo de outras biomassas	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	20,7%	9,3%	0
2026	20,9%	10,1%	39
2027	21,1%	10,9%	79
2028	21,2%	11,7%	120
2029	21,4%	12,6%	164
2030	21,6%	13,4%	208
2031	21,7%	14,2%	252
2032	21,9%	15,1%	297
2033	22,1%	15,9%	343
2034	22,3%	16,7%	390
2035	22,4%	17,6%	438
2036	22,6%	18,4%	486
2037	22,8%	19,2%	535
2038	22,9%	20,0%	585
2039	23,1%	20,9%	636
2040	23,3%	21,7%	687
2041	23,5%	22,5%	744
2042	23,6%	23,4%	801
2043	23,8%	24,2%	860
2044	24,0%	25,0%	920
2045	24,1%	25,9%	982
2046	24,3%	26,7%	1.044
2047	24,5%	27,5%	1.108
2048	24,7%	28,3%	1.173
2049	24,8%	29,2%	1.240
2050	25,0%	30,0%	1.310



Tecnologia: Substituição de combustíveis fósseis - Química

Ano inicial: 2026

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

4.040 ktCO₂e**-2.717 Milhões de R\$****673 R\$/tCO₂e**

Premissas técnicas:

- O projeto visa a transição de combustíveis fósseis para combustíveis alternativos, nesse caso, eletricidade e biometano, atingindo a representatividade, em 2050, de 65% e 15%, respectivamente;
- A projeção da matriz foi feita com base em SEEG (2023) e COPPE-UFRJ/UFMG/USP (2022).

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 5.815.000 R\$/ktep com base em WEST *et al.* (2021); IEMA (2017); ELEMENT ENERGY (2018);
- O OPEX adotado foi de 5% do CAPEX, resultando em 290.750 R\$/ktep com base em: WEST *et al.* (2021); IEMA (2017); ELEMENT ENERGY (2018);
- Os gastos de consumo de combustível foi feita considerando a diferença de consumo entre anos subsequentes, com base nos preços vigentes em 2024.

Ano	Consumo de eletricidade	Consumo de biometano	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	55,0%	0,0%	0
2026	55,4%	0,6%	11
2027	55,8%	1,2%	21
2028	56,2%	1,8%	31
2029	56,6%	2,4%	42
2030	57,0%	3,0%	53
2031	57,4%	3,6%	65
2032	57,8%	4,2%	77
2033	58,2%	4,8%	89
2034	58,6%	5,4%	101
2035	59,0%	6,0%	114
2036	59,4%	6,6%	127
2037	59,8%	7,2%	140
2038	60,2%	7,8%	154
2039	60,6%	8,4%	168
2040	61,0%	9,0%	182
2041	61,4%	9,6%	197
2042	61,8%	10,2%	212
2043	62,2%	10,8%	227
2044	62,6%	11,4%	242
2045	63,0%	12,0%	257
2046	63,4%	12,6%	273
2047	63,8%	13,2%	289
2048	64,2%	13,8%	306
2049	64,6%	14,4%	322
2050	65,0%	15,0%	339



Tecnologia: Substituição de combustíveis fósseis - Mineração

Ano inicial: 2026

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

7.767 ktCO₂e**-3.309 Milhões de R\$****426 R\$/tCO₂e**

Premissas técnicas:

- O projeto visa a transição de combustíveis fósseis para combustíveis alternativos, nesse caso, eletricidade e biometano, atingindo a representatividade, em 2050, de 60% e 7%, respectivamente;
- A projeção da matriz foi feita com base em SEEG (2023) e COPPE-UFRJ/UFMG/USP (2022).

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 5.815.000 R\$/ktep com base em WEST *et al.* (2021); IEMA (2017); ELEMENT ENERGY (2018);
- O OPEX adotado foi de 5% do CAPEX, resultando em 290.750 R\$/ktep com base em West *et al.* (2021); IEMA (2017); ELEMENT ENERGY (2018);
- Os gastos de consumo de combustível foi feita considerando a diferença de consumo entre anos subsequentes, com base nos preços vigentes em 2024.

Ano	Consumo de eletricidade	Consumo de biometano	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	46,7%	0,0%	0
2026	47,2%	0,3%	19
2027	47,7%	0,6%	40
2028	48,3%	0,8%	61
2029	48,8%	1,1%	83
2030	49,3%	1,4%	105
2031	49,9%	1,7%	128
2032	50,4%	2,0%	150
2033	50,9%	2,2%	173
2034	51,5%	2,5%	197
2035	52,0%	2,8%	221
2036	52,5%	3,1%	245
2037	53,1%	3,4%	270
2038	53,6%	3,6%	295
2039	54,1%	3,9%	320
2040	54,7%	4,2%	346
2041	55,2%	4,5%	375
2042	55,7%	4,8%	403
2043	56,3%	5,0%	433
2044	56,8%	5,3%	463
2045	57,3%	5,6%	493
2046	57,9%	5,9%	525
2047	58,4%	6,2%	557
2048	58,9%	6,4%	589
2049	59,5%	6,7%	622
2050	60,0%	7,0%	656



Tecnologia: Substituição de combustíveis fósseis - Outras indústrias

Ano inicial: 2026

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

41.150 ktCO₂e

-13.199 Milhões de R\$

321 R\$/tCO₂e



Premissas técnicas:

- O projeto visa a transição de combustíveis fósseis para combustíveis alternativos, nesse caso, eletricidade e biometano, atingindo a representatividade, em 2050, de 45,6% e 4%, respectivamente;
- A projeção da matriz foi feita com base em SEEG (2023) e COPPE-UFRJ/UFGM/USP (2022).

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 5.815.000 R\$/ktep com base em WEST *et al.* (2021); IEMA (2017); ELEMENT ENERGY (2018);
- O OPEX adotado foi de 5% do CAPEX, resultando em 290.750 R\$/ktep com base em: WEST *et al.* (2021); IEMA (2017); ELEMENT ENERGY (2018);
- Os gastos de consumo de combustível foi feita considerando a diferença de consumo entre anos subsequentes, com base nos preços vigentes em 2024.

Ano	Consumo de eletricidade	Consumo de biometano	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	34,9%	0,0%	0
2026	35,4%	0,2%	103
2027	35,8%	0,3%	211
2028	36,2%	0,5%	323
2029	36,6%	0,6%	439
2030	37,1%	0,8%	560
2031	37,5%	1,0%	678
2032	37,9%	1,1%	798
2033	38,4%	1,3%	921
2034	38,8%	1,4%	1.045
2035	39,2%	1,6%	1.172
2036	39,6%	1,8%	1.301
2037	40,1%	1,9%	1.432
2038	40,5%	2,1%	1.564
2039	40,9%	2,2%	1.699
2040	41,3%	2,4%	1.836
2041	41,8%	2,6%	1.985
2042	42,2%	2,7%	2.137
2043	42,6%	2,9%	2.292
2044	43,0%	3,0%	2.450
2045	43,5%	3,2%	2.612
2046	43,9%	3,4%	2.777
2047	44,3%	3,5%	2.944
2048	44,8%	3,7%	3.115
2049	45,2%	3,8%	3.289
2050	45,6%	4,0%	3.466



Tecnologia: Redução Direta a Gás Natural - Ferro-gusa e Aço

Ano inicial: 2026

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

27.809 ktCO₂e

-19.327 Milhões de R\$

695 R\$/tCO₂e



Premissas técnicas:

- O projeto visa alterar a rota tecnológica de produção de alto forno a carvão mineral para redução direta à gás natural, transicionando de uma representatividade de 0% em 2025 até 15% em 2050. A representatividade da tecnologia de alto forno a carvão mineral caiu de 75% em 2025 para 44% em 2050;
- A projeção da matriz energética das indústrias foi feita com base em PINTO *et al.* (2018).

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 500 USD/t com base em ARENS, WORRELL, SCHLEICH (2012); EUROFER (2013); OTTO *et al.* (2017); TECNORED (2021); VAN RUIJVEN *et al.* (2016); VOGL, OLSSON, NYKVIST (2021);
- O OPEX adotado foi de 50 USD/t com base em ARENS, WORRELL, SCHLEICH (2012); EUROFER (2013); OTTO *et al.* (2017); TECNORED (2021); VAN RUIJVEN *et al.* (2016); VOGL, OLSSON, NYKVIST (2021);
- Os gastos de consumo de combustível foi feita considerando a diferença de consumo entre anos subsequentes, com base nos preços vigentes em 2024.

Ano	Percentual de aplicação do projeto	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	0,0%	0
2026	0,6%	70
2027	1,2%	142
2028	1,8%	217
2029	2,4%	296
2030	3,0%	377
2031	3,6%	457
2032	4,2%	539
2033	4,8%	622
2034	5,4%	708
2035	6,0%	794
2036	6,6%	883
2037	7,2%	973
2038	7,8%	1.064
2039	8,4%	1.158
2040	9,0%	1.252
2041	9,6%	1.351
2042	10,2%	1.452
2043	10,8%	1.554
2044	11,4%	1.658
2045	12,0%	1.764
2046	12,6%	1.872
2047	13,2%	1.982
2048	13,8%	2.094
2049	14,4%	2.207
2050	15,0%	2.322



Grupo 3: Medidas inovadoras

Tecnologia: Redução Direta a H2 - Ferro-gusa e Aço

Ano inicial: 2040

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

15.688 ktCO₂e**-6.455 Milhões de R\$****411 R\$/tCO₂e**

Premissas técnicas:

- O projeto visa alterar a rota tecnológica de produção de alto forno a carvão mineral para redução direta à H₂, transicionando de uma representatividade de 0% em 2025, iniciando em 2040 com 0,9% e chegando em 2050 com 10%. A representatividade da tecnologia de alto forno a carvão mineral caiu de 75% em 2025 para 34% em 2050;
- A projeção da matriz energética das indústrias foi feita com base em PINTO *et al.* (2018).

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 574 USD/t com base em ARENS, WORRELL, SCHLEICH (2012); EUROFER (2013); OTTO *et al.* (2017); TECNORED (2021); VAN RUIJVEN *et al.* (2016); VOGL, OLSSON, NYKVIST (2021);
- O OPEX adotado foi de 85 USD/t com base em ARENS, WORRELL, SCHLEICH (2012); EUROFER (2013); OTTO *et al.* (2017); TECNORED (2021); VAN RUIJVEN *et al.* (2016); VOGL, OLSSON, NYKVIST (2021);
- Os gastos de consumo de combustível foi feita considerando a diferença de consumo entre anos subsequentes, com base nos preços vigentes em 2024.

Ano	Percentual de aplicação do projeto	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	0,0%	0
2026	0,0%	0
2027	0,0%	0
2028	0,0%	0
2029	0,0%	0
2030	0,0%	0
2031	0,0%	0
2032	0,0%	0
2033	0,0%	0
2034	0,0%	0
2035	0,0%	0
2036	0,0%	0
2037	0,0%	0
2038	0,0%	0
2039	0,0%	0
2040	0,9%	220
2041	1,8%	446
2042	2,7%	676
2043	3,6%	912
2044	4,5%	1.154
2045	5,5%	1.400
2046	6,4%	1.652
2047	7,3%	1.909
2048	8,2%	2.171
2049	9,1%	2.438
2050	10,0%	2.710



Tecnologia: CCS - Ferro-gusa e Aço

Ano inicial: 2040

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

10.425 ktCO₂e**-4.151 Milhões de R\$****398 R\$/tCO₂e**

Premissas técnicas:

- O projeto visa a instalação de soluções de captura e armazenamento de carbono na indústria a partir de 2040, chegando a 2050 com uma aplicação em 25% da produção;
- A captura é calculada em cima das emissões de processo, especificamente sob as emissões de coque de carvão mineral.

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 717 USD/t com base em GARDARSDOTTIR *et al.* (2019); VOLDUND *et al.* (2019); PALTSEV, S. *et al.* (2021);
- O OPEX adotado foi de 85 USD/t com base em: GARDARSDOTTIR *et al.* (2019); VOLDUND *et al.* (2019); PALTSEV, S. *et al.* (2021);

Ano	Percentual de aplicação do projeto	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	0,0%	0
2026	0,0%	0
2027	0,0%	0
2028	0,0%	0
2029	0,0%	0
2030	0,0%	0
2031	0,0%	0
2032	0,0%	0
2033	0,0%	0
2034	0,0%	0
2035	0,0%	0
2036	0,0%	0
2037	0,0%	0
2038	0,0%	0
2039	0,0%	0
2040	2,3%	198
2041	4,5%	386
2042	6,8%	562
2043	9,1%	726
2044	11,4%	878
2045	13,6%	1.016
2046	15,9%	1.141
2047	18,2%	1.251
2048	20,5%	1.347
2049	22,7%	1.427
2050	25,0%	1.492



Tecnologia: CCS - Cimento

Ano inicial: 2041

Redução total de emissões:

Valor Presente Líquido:

Custo Marginal de Abatimento:

Ano final: 2050

4.299 ktCO₂e**-6.151 Milhões de R\$****1.431 R\$/tCO₂e**

Premissas técnicas:

- O projeto visa a instalação de soluções de captura e armazenamento de carbono na indústria a partir de 2040, chegando a 2050 com uma aplicação em 9% da produção;
- A captura é calculada sob as emissões de processo e energia.

Premissas financeiras:

- A taxa de desconto aplicada foi de 8%;
- O CAPEX adotado foi de 2.156 R\$/t cimento com base em PALTSEV *et al.* (2021);
- O OPEX adotado foi de 5% do CAPEX, resultando em 107,8 R\$/t cimento com base em PALTSEV *et al.* (2021).

Ano	Percentual de aplicação do projeto	Redução Anual de GEE (ktCO ₂ e/ano)
2025	0,0%	0
2026	0,0%	0
2027	0,0%	0
2028	0,0%	0
2029	0,0%	0
2030	0,0%	0
2031	0,0%	0
2032	0,0%	0
2033	0,0%	0
2034	0,0%	0
2035	0,0%	0
2036	0,0%	0
2037	0,0%	0
2038	0,0%	0
2039	0,0%	0
2040	0,0%	0
2041	0,9%	80
2042	1,8%	159
2043	2,7%	238
2044	3,6%	316
2045	4,5%	394
2046	5,4%	471
2047	6,3%	548
2048	7,2%	623
2049	8,1%	698
2050	9,0%	771



Bruna Araújo

bruna.araujo@waycarbon.com

Laise Mondo

laise.mondo@waycarbon.com

Letícia Gavioli

leticia.gavioli@waycarbon.com

Nathalia Pereira

nathalia.pereira@waycarbon.com

Luiza Oliveira

luiza.oliveira@waycarbon.com

Otávio Braga

otavio.braga@waycarbon.com

Pedro Passarini

pedro.passarini@waycarbon.com