

RELATÓRIO DE EXECUÇÃO DO OBJETO

P2.2 – CENÁRIOS DE DESCARBONIZAÇÃO INDÚSTRIA

Referência: INVESTMINAS/CT/25/2024

Este relatório compõe o Produto 2.2 – Cenários de Descarbonização Indústria, conforme previsto na Cláusula 6.ª do Contrato INVESTMINAS/CT/25/2024. O objeto foi executado em sua integridade durante o período de novembro de 2024 a janeiro de 2025, incluindo revisões e ajustes entre abril e julho de 2025.



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

Cenários de Descarbonização – Indústria



Sumário

ACRÔNIMOS.....	5
INTRODUÇÃO.....	7
CONTEXTUALIZAÇÃO	8
ABORDAGEM METODOLÓGICA	10
Cenário Base	11
Cenário <i>Net Zero</i>	13
METODOLOGIA APLICADA E RESULTADOS.....	15
Cenário Base	15
Ferro-gusa e aço	17
Cimento e cal.....	20
Demais segmentos industriais	23
Avaliação do Cenário Base.....	26
Cenário <i>Net Zero</i>	27
Plano de Descarbonização de Minas Gerais (PDMG).....	28
DDS (DDP <i>Initiative</i>)	28
NGFS (GCAM).....	29
SBTi.....	29
Avaliação dos Cenários <i>Net Zero</i>	30
DESTAQUES E PRÓXIMOS PASSOS	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34



Índice de figuras

Figura 1: Curvas ilustrativas dos Cenários Base, <i>Net Zero</i> e Rota.....	11
Figura 2: Fluxo lógico generalista da metodologia <i>bottom-up</i>	12
Figura 3: Fluxo lógico generalista da metodologia <i>top-down</i>	12
Figura 4: Participação dos segmentos industriais no nível de emissões industriais de Minas Gerais.....	15
Figura 5: Resumo geral da metodologia (<i>bottom-up</i>)	17
Figura 6: Esquema simplificado do método utilizado para estimativa de emissões no setor de ferro-gusa e aço.....	19
Figura 7: Esquema simplificado do método para estimativa das emissões no setor de cimento	22
Figura 8: Fluxo do balanço de energia útil	23
Figura 9: Esquema simplificado do método para estimar as emissões dos demais segmentos industriais	26
Figura 10: Evolução das emissões de GEE no Cenário Base por segmento industrial	27
Figura 11: Trajetória de emissões nos cenários avaliados, em relação ao ano-base 2023...	31
Figura 12: Comparativo Cenário Base versus Cenários <i>Net Zero</i>	32

Índice de tabelas

Tabela 1: Consumo energético específico da produção de ferro-gusa e aço	17
Tabela 2: Matriz energética para o setor de ferro-gusa e aço.....	18
Tabela 3: Emissões projetadas do setor de ferro-gusa e aço (MtCO _{2e})	20
Tabela 4: Emissões do setor de cimento em Minas Gerais entre 2020 e 2050 em MtCO _{2e} ..	22
Tabela 5: Emissões da produção de cal em Minas Gerais entre 2020 e 2050 em MtCO _{2e} ..	23
Tabela 6: Emissões projetadas para os demais segmentos industriais em MtCO _{2e}	26
Tabela 7: Cenário PDMG	28
Tabela 8: Cenário DDS	28
Tabela 9: Cenário NGFS.....	29
Tabela 10: Cenário SBTi	30

Índice de quadros

Quadro 1: Características dos Cenários <i>Net Zero</i>	31
--	----



ACRÔNIMOS

AFOLU – Agropecuária, Floresta e Outros Usos da Terra

BAU – *Business as Usual* (Cenário Tendencial)

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

BEU – Balanço de Energia Útil

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

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

CDP – *Carbon Disclosure Project*

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

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

GEE – gases de efeito estufa

IABr – Instituto Aço Brasil

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

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)

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

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MOE – *Molten Oxide Electrolysis*

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

NGFS – *Network for Greening the Financial System*

PDMG – Plano de Descarbonização para o Estado de Minas Gerais

PIB – Produto Interno Bruto

PLAC-MG – Plano de Ação Climática de Minas Gerais

PMR – *Partnership for Market Readines*

REGAP – Refinaria Gabriel Passos

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)

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

ktep – Quilotonelada Equivalente de Petróleo

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

USP – Universidade de São Paulo

WRI – *World Resources Institute*

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



INTRODUÇÃO

Este documento tem como objetivo apresentar os cenários de descarbonização para o setor de indústria no estado de Minas Gerais, compondo o *roadmap* setorial em desenvolvimento no âmbito do projeto Rota. Para cumprir esse propósito, o documento está organizado em quatro seções:

Seção 1: traz uma breve contextualização do projeto Rota;

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

Seção 3: detalha as premissas e modelagens utilizadas para o cálculo das emissões das indústrias de ferro-gusa e aço, cimento, mineração, ferroligas, química e outras indústrias. O Cenário *Net Zero* é apresentado em subseções, que descrevem as abordagens adotadas na construção dos cenários analisados;

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

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



CONTEXTUALIZAÇÃO

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

- elaboração de diagnósticos setoriais;
- construção de cenários de descarbonização;
- mapeamento e priorização das principais soluções tecnológicas, por meio da construção da Curva de Custo Marginal de Abatimento (MACC, na sigla em inglês);¹
- identificação de necessidades e oportunidades de investimento;
- construção de propostas de implementação ou revisão de políticas públicas.

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

Na presente etapa, o *roadmap* avança para a análise de cenários de descarbonização, avaliando as projeções de emissões de gases de efeito estufa (GEE) nos quatro setores considerados. Inicialmente, será adotado um cenário de referência *Business as Usual* (BAU), que pressupõe a ausência de novas tecnologias e um crescimento econômico projetado (Cenário Base). Em seguida, os resultados foram comparados com diferentes cenários de neutralidade climática modelados pela literatura especializada, permitindo medir o esforço necessário para alinhar o estado a uma trajetória *Net Zero* (Cenários *Net Zero*).

Esses cenários servirão de subsídio para a construção da MACC, ou curva MAC, permitindo avaliar as tecnologias de baixo carbono em termos de seu potencial de redução de emissões e dos custos a elas associados, o que, por sua vez, permite estimar a contribuição dessas tecnologias para o atingimento das metas de descarbonização. Importante destacar que a elaboração da MACC, etapa 3 do projeto, auxiliará na identificação do Cenário Rota, que representa os esforços necessários, em termos de tecnologias de mitigação, para deslocar a curva de emissões do Cenário Base até o atingimento das metas apresentadas nos cenários *Net Zero*.

Na fase seguinte desta etapa, será elaborado um documento específico voltado à estruturação de um portfólio de investimentos estratégicos para a implementação do *roadmap* de descarbonização dos setores do projeto (parte 2). Isso incluirá o mapeamento do panorama de investimentos, a avaliação da aderência às curvas MAC, a consolidação de

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



custos e a identificação da demanda de investimentos, garantindo uma base técnica e financeira robusta para direcionar recursos a tecnologias de baixo carbono em Minas Gerais.

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

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



 INVEST
MINAS

 WAY
CARBON

ABORDAGEM METODOLÓGICA

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

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

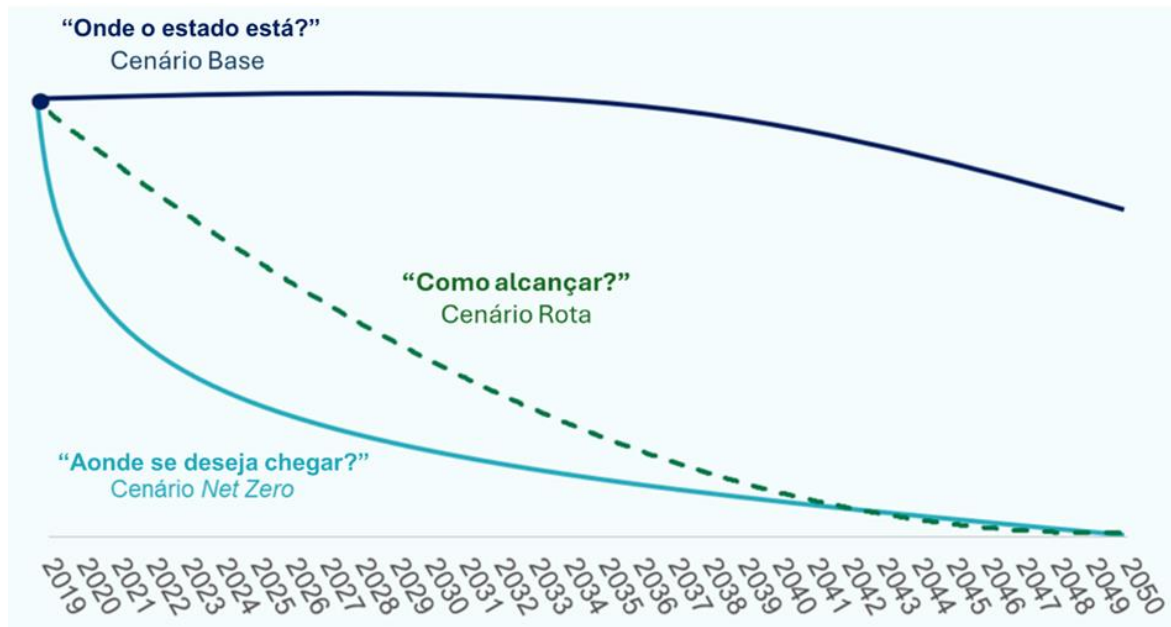
Dessa forma, a construção de cenários de descarbonização constitui uma das principais etapas para o desenvolvimento de planos de descarbonização. Para o projeto Rota, são utilizados três cenários em conjunto representados na Figura 1.

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



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

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



Fonte: Elaboração própria.

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

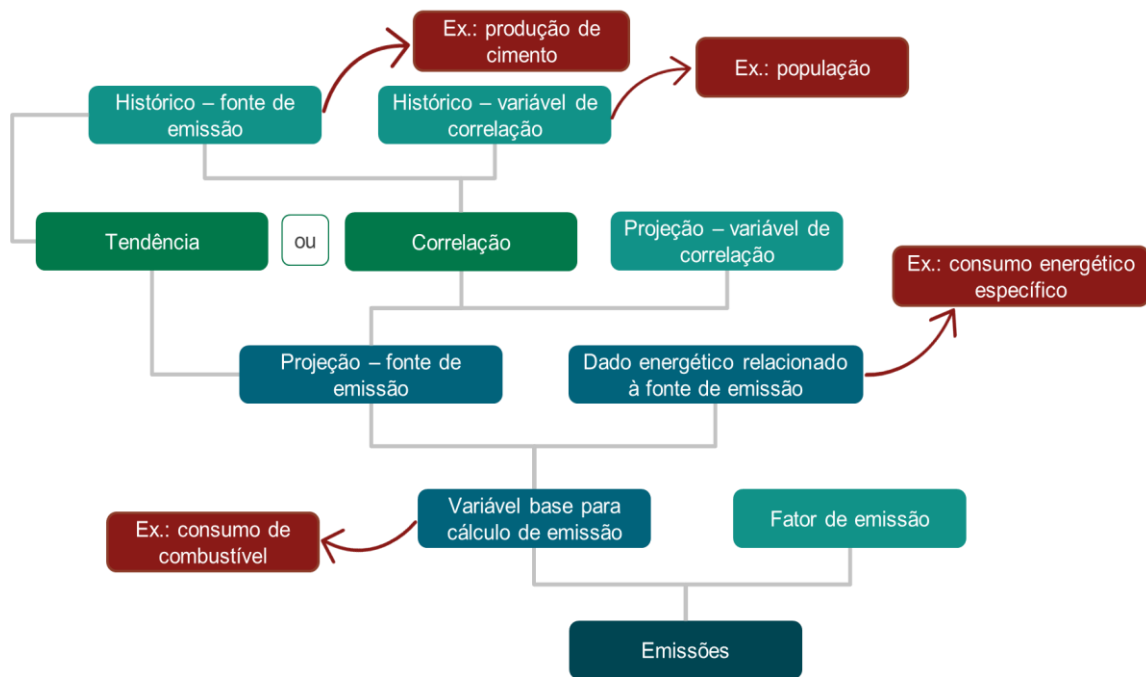
Cenário Base

A elaboração do Cenário Base dos quatro setores fundamentou-se nas abordagens *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.

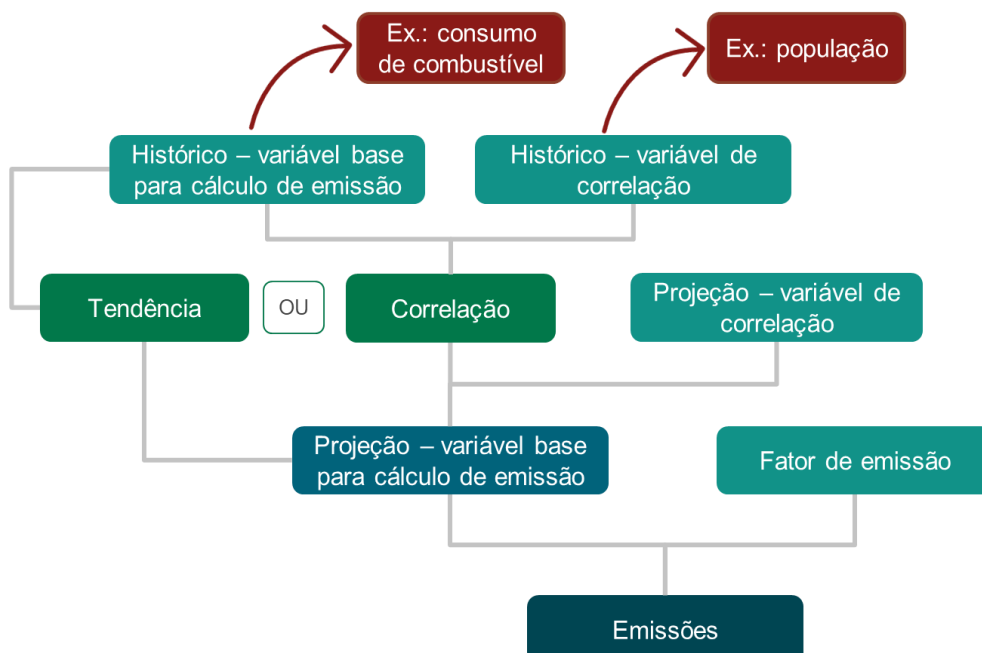
Esses dados permitem transformar a fonte emissora em uma variável energética, que, por sua vez, é usada no cálculo das emissões finais, com as emissões geradas pelo processo industrial.



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

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

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

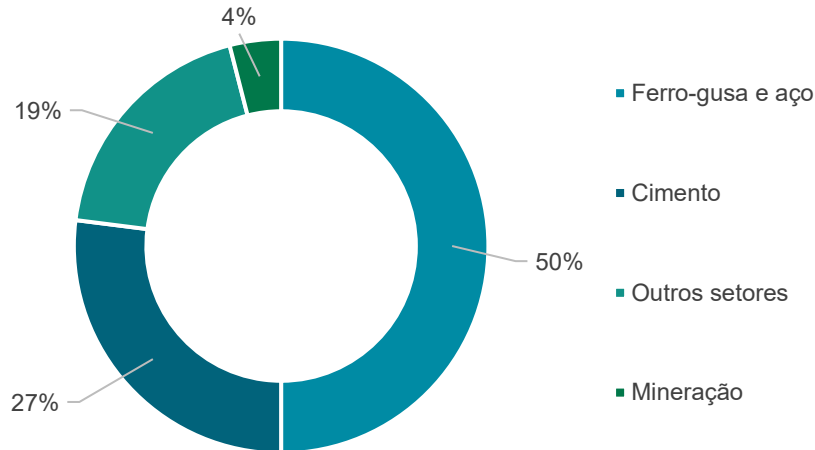


METODOLOGIA APLICADA E RESULTADOS

Como ilustrado anteriormente, a definição dos cenários de descarbonização se baseia na identificação de padrões históricos entre as fontes de emissão e do crescimento de determinadas variáveis (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 4), 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 4: 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).

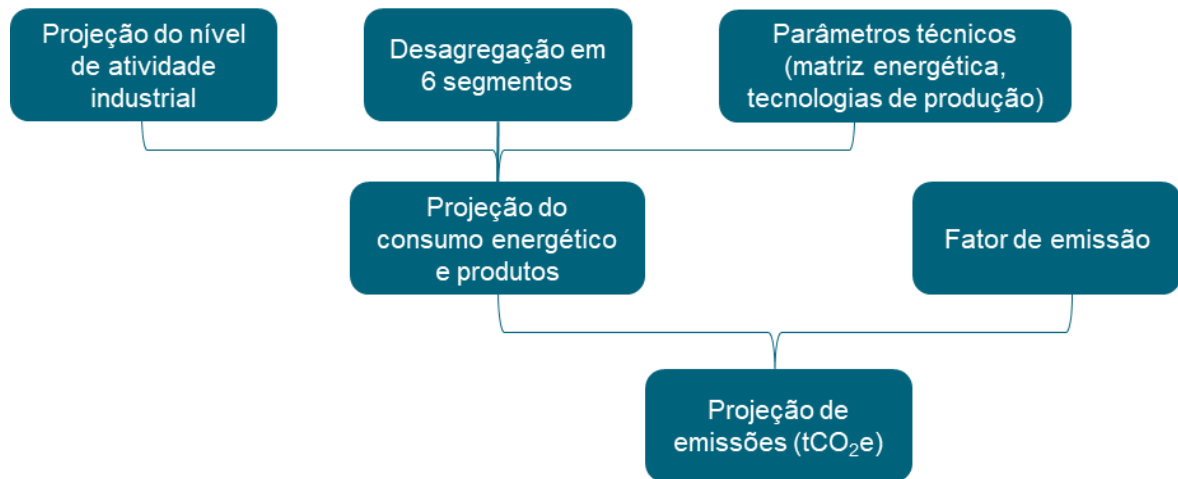
A desagregação da modelagem foi estruturada de forma a considerar os segmentos que são responsáveis pela maior parte das emissões, além da importância na atividade econômica do setor industrial. Dessa forma, a modelagem de cálculo foi elaborada para os segmentos (i) ferro-gusa e aço; (ii) cimento e cal; 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 5 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 5: 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 6 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 6: 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.

$$\text{EmissãoGEE}_{\text{ano}} = \sum_i \sum_k \left(\text{CEspecífico}_{n,i} \cdot P_{i,\text{ano}} \cdot \text{FatorEmissão}_n \right) - (\text{CC} \cdot P_{i,\text{ano}})$$

Na qual:

- **EmissãoGEE_{ano}** é a emissão total de gases de efeito estufa;
- **CEspecífico_{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;
- **FatorEmissão_n** 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

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



emissões de processo, uma vez que as emissões de energia estão contabilizadas na 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 7 apresenta um esquema simplificado da metodologia utilizada para o cálculo das emissões da indústria de cimento.

Figura 7: 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}

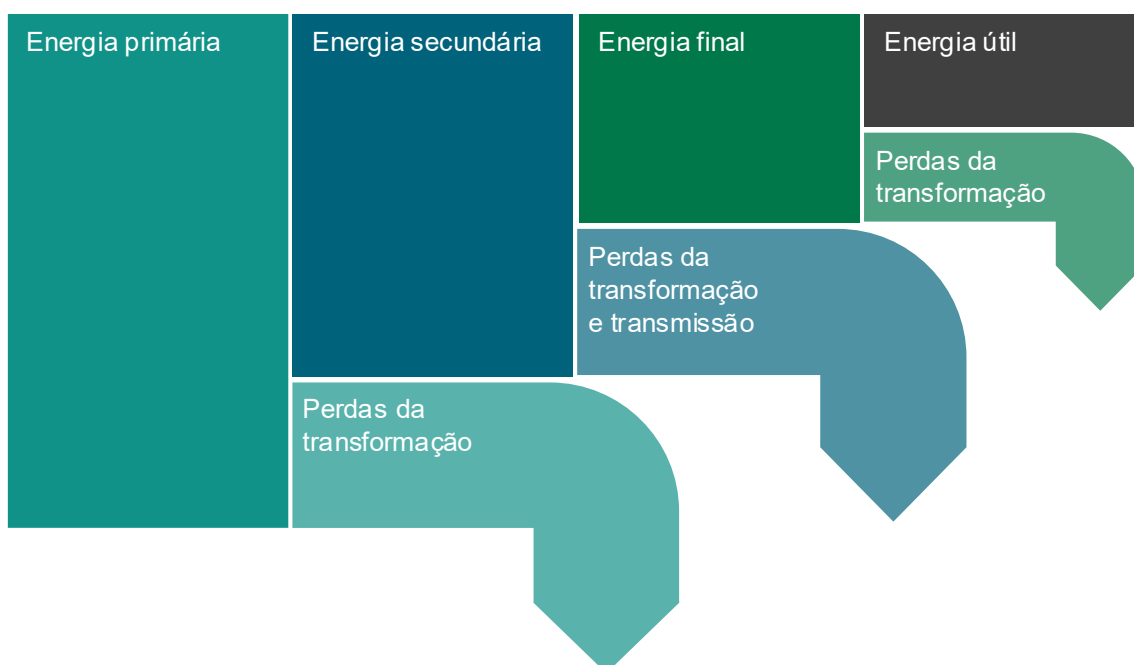
Setor	Fonte	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Cal	Processo	3,51	3,68	4,10	4,33	4,57	4,91	5,26

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, 2018), conforme apresentado na Figura 8. 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 8: Fluxo do balanço de energia útil



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

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.

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

Nessa equação:

- **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).

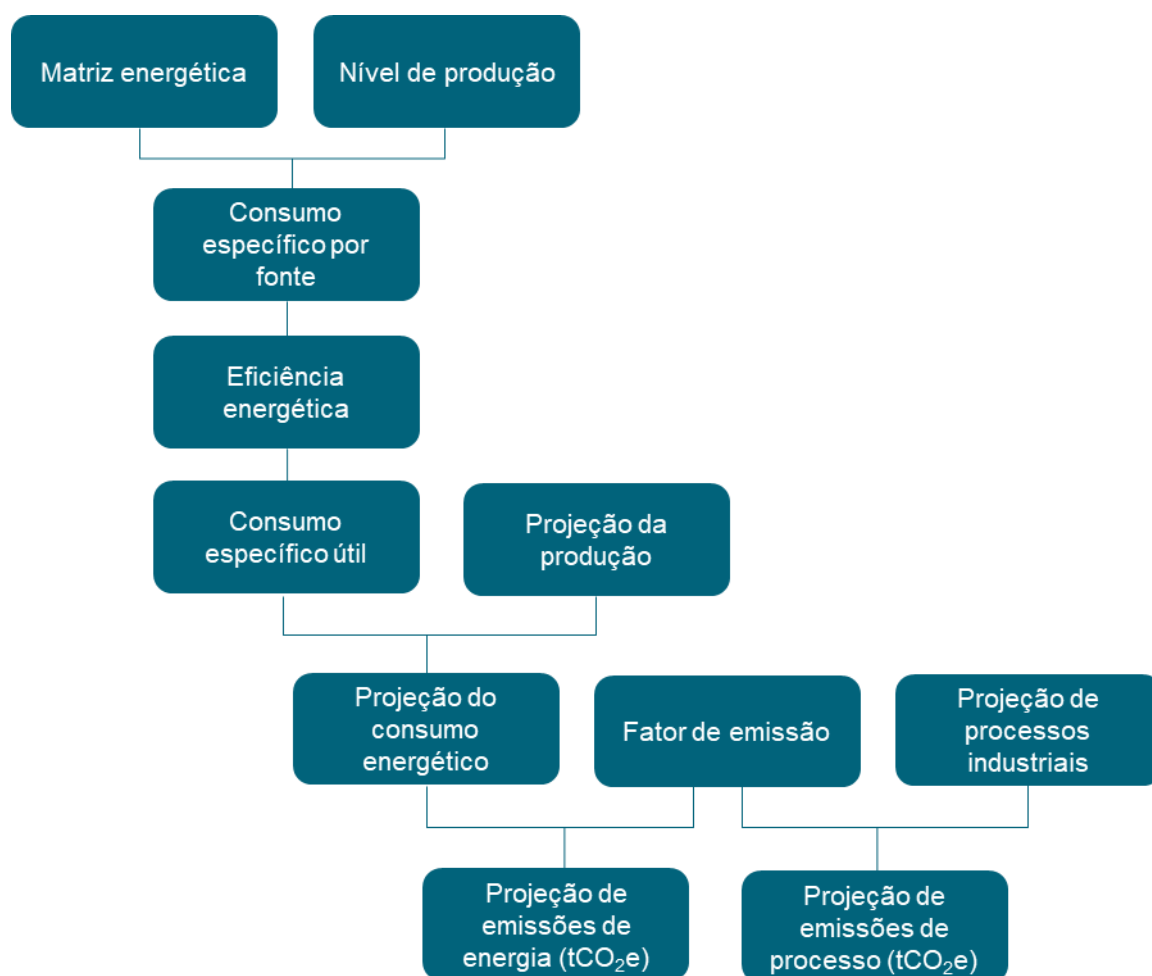
Importante destacar que a indústria de ferroligas também apresenta emissões de processo de forma similar ao setor de ferro-gusa e aço, em que ocorre a redução do minério, formando dióxido de carbono. Da mesma maneira, considerou-se que as emissões provenientes do uso de carvão e coque seriam alocadas 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 9 apresenta um esquema resumido da metodologia utilizada para projetar o consumo de energia e emissões dos demais segmentos industriais.



Figura 9: 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

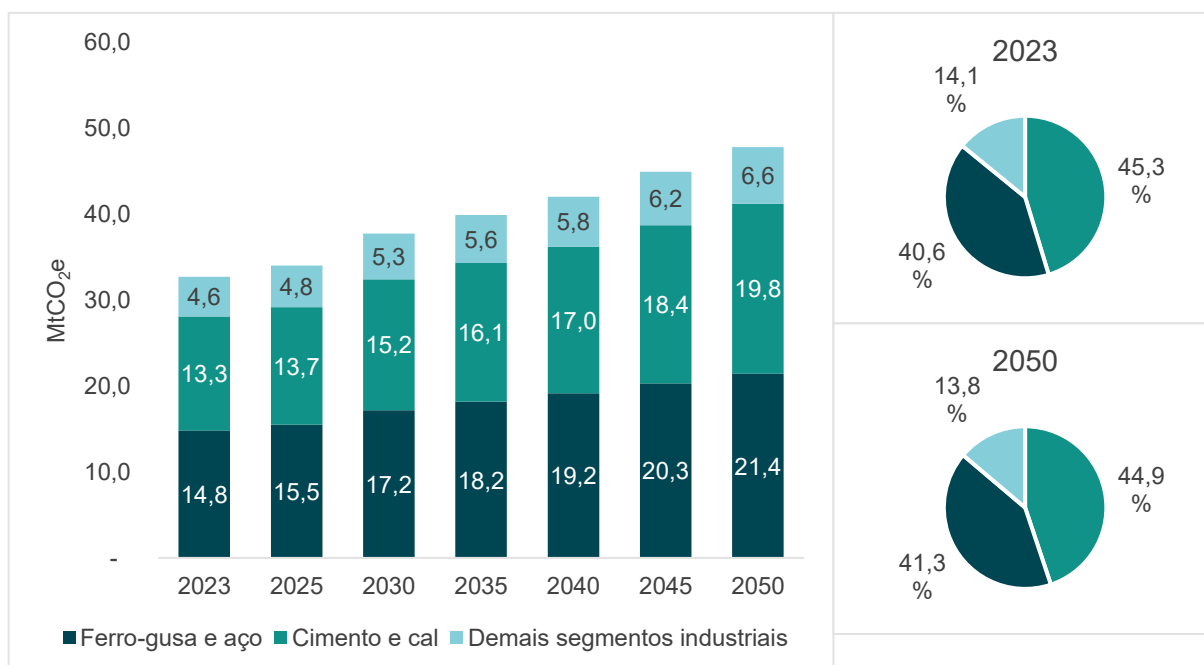
Por fim, as emissões totais do setor industrial no Cenário Base são apresentadas na Figura 10. Com um valor próximo de 32,7 MtCO_{2e} em 2023, as emissões no estado atingem cerca



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 10: 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 COPPE-UFRJ; UFMG; USP (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. 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 (2024).

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 5 e 10 anos) e longo prazo (que devem ser atingidas até 2050). A meta de curto prazo exige

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.



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 dos Cenários *Net Zero*

No contexto do Cenário *Net Zero*, diversos modelos vêm sendo desenvolvidos para aprimorar a análise do impacto das mudanças climáticas na economia. Enquanto o cenário do PDMG tem desagregação para o setor 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*

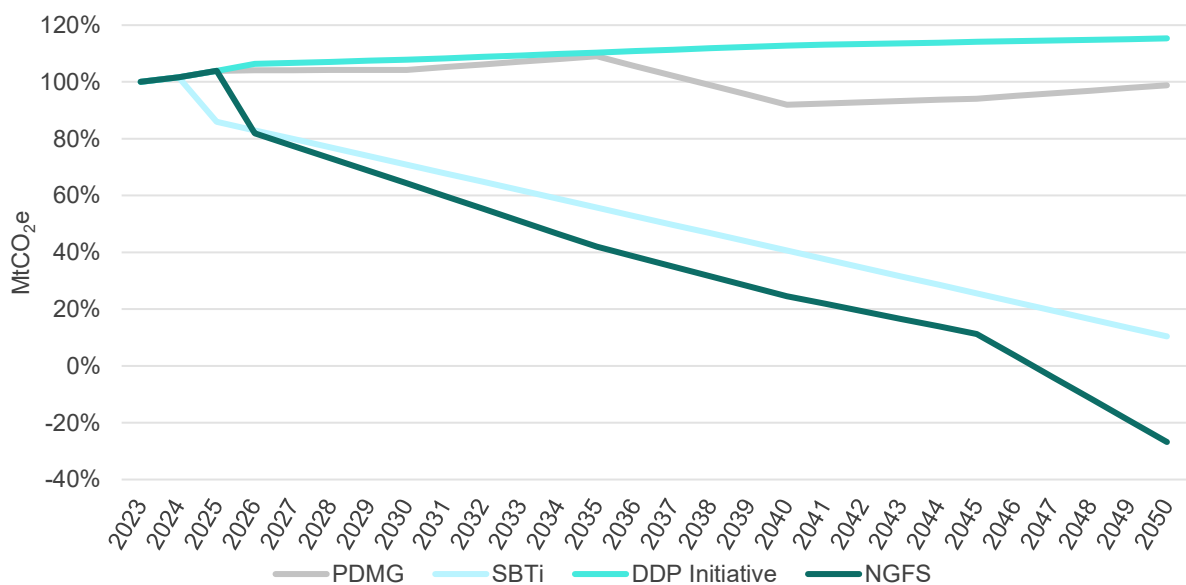
Cenários	Tem dados regionalizados para o Brasil?	Tem dados regionalizados para Minas Gerais?	Tem desagregação setorial compatível com o estudo?	Tem desagregação subsetorial compatível com o estudo?
PDMG (BLUES/COPPE)	✓	✓	✓	✓
NGFS (GCAM)	✓	✗	✓	✓
DDS (DDP <i>Initiative</i>)	✓	✗	✓	✗
SBTi	✗	✗	✗	✗

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

Figura 11: Trajetória de emissões nos cenários avaliados, em relação ao ano-base 2023

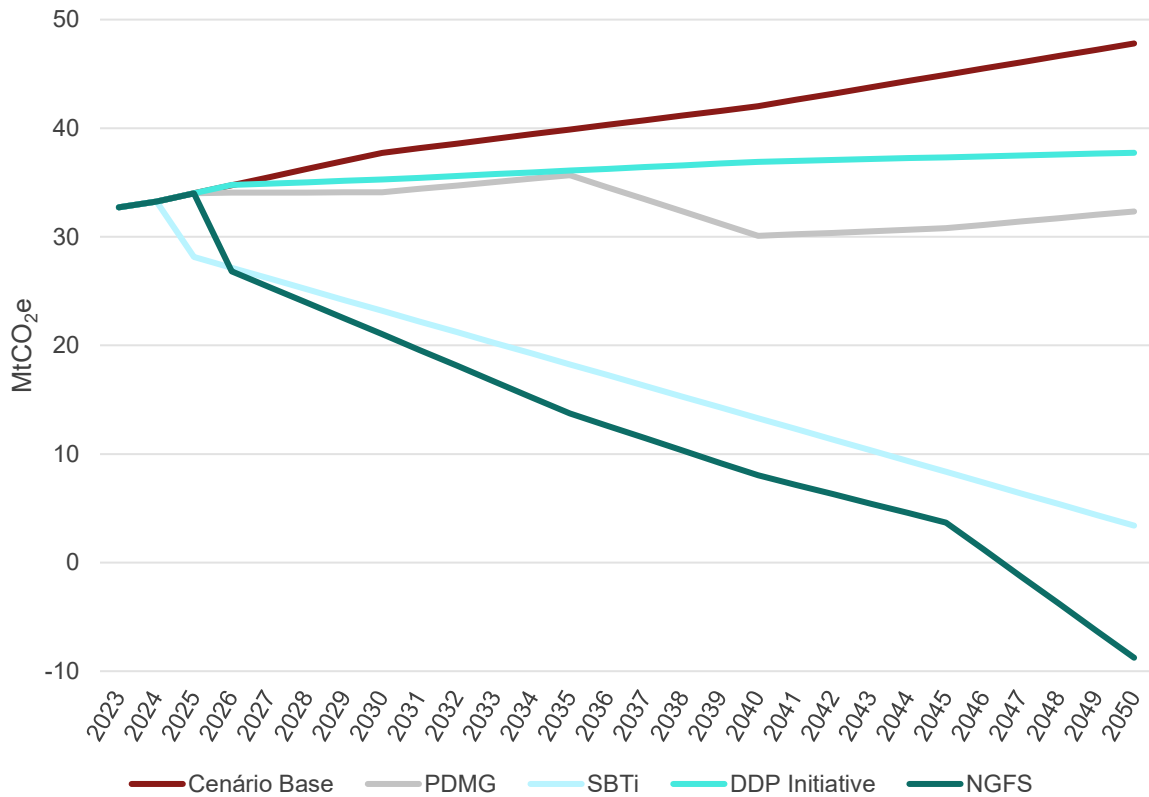


Fonte: Elaboração própria.



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



DESTAQUES E PRÓXIMOS PASSOS

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

Esse cenário foi calculado por meio de uma 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 indicam que, seguindo um comportamento tendencial, as emissões de GEE do setor no estado devem apresentar um aumento de, aproximadamente, 46% entre 2023 e 2050.

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



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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

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

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

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

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.

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.

Instituto Aço Brasil (IABr). **Anuário Estatístico**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2016-2024. ISSN 1806-3195. Anual. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/site/publicacoes>. Acesso em: 30 dez. 2024.

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.

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



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.

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

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

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.



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

