

Estudo de Oportunidade de Eficiência Energética na Indústria

Diretoria de Energia



DESENVOLVIMENTO
ECONÔMICO



**GOVERNO
DE MINAS**

AQUI O TREM PROSPERA.

Resumo Executivo

Finalidade, Público-Alvo e Escopo

A finalidade primordial do Estudo é analisar dados secundários sobre eficiência energética no âmbito de Minas Gerais para, assim, oferecer um guia estratégico para a otimização do uso de energia em instalações industriais. O público-alvo principal são gestores, técnicos e engenheiros do setor industrial que buscam reduzir custos operacionais e melhorar a sustentabilidade de suas plantas. O escopo abrange análises setoriais, a identificação de pontos de desperdício, levantamento de cases de sucesso e a proposição de soluções técnicas e de gestão em sistemas industriais chave.

Contexto e Alinhamento Estratégico

O estudo surge no contexto de busca pela emissão líquida de Gases de Efeito Estufa (GEE) igual a zero. Minas Gerais aderiu à campanha global Race to Zero e estruturou o Plano Estadual de Ação Climática (PLAC-MG), estabelecendo metas e trajetórias para 2030 e 2050. Ele se alinha estrategicamente à melhoria do aproveitamento das fontes de energia, garantindo que a produção industrial seja mantida ou até ampliada com menor consumo energético. A eficiência energética é posicionada não como despesa, mas como um investimento essencial que proporciona resiliência operacional e financeira.

Como Usar o Documento e Oportunidades Técnicas

O estudo é estruturado para servir como um roteiro de diagnóstico baseado em dados secundários, orientando a identificação de padrões e oportunidades. Recomenda-se iniciar pela análise de emissões e consumo energético, seguida da avaliação das oportunidades técnicas detalhadas por sistema.

As principais oportunidades técnicas abordadas incluem:

- Gestão de energia e processos;
- Novas tecnologias;
- Digitalização e automação;
- Eletrificação industrial; e
- Retrofit.

O Que o Estudo Contém

- Contextualização das Políticas Estaduais de Transição Energética;
- Panorama do setor industrial mineiro;
- Análise do consumo elétrico mineiro;
- Análise das emissões de GEE setoriais;
- Panorama da Intensidade Elétrica de Minas;
- Mapeamento setoriais: Indústria de Metais, Produtos Minerais e Indústria Química;
- Levantamento de políticas, iniciativas e financiamentos;
- Levantamento de oportunidade de eficiência energética.

Resultados Esperados

- Redução significativa de custos operacionais com energia;
- Melhoria da competitividade da indústria no mercado;
- Aumento da vida útil e melhor desempenho dos equipamentos;
- Redução dos impactos ambientais e contribuição para metas de ação climática;
- Aumento da segurança energética da unidade industrial.



Mila Corrêa da Costa

Secretária de Estado de Desenvolvimento Econômico

Frederico Amaral e Silva

Secretário Adjunto de Desenvolvimento Econômico

Bruno Araújo Oliveira

Secretário Executivo de Estado de Desenvolvimento Econômico

Daniel Guimarães Medrado de Castro

Subsecretário de Atração de Investimentos e Cadeias Produtivas

Raphael Evaristo Rodrigues

Superintendente de Política Minerária, Energética e Logística

Gustavo Caetano Ribeiro de Melo

Diretor de Energia

María José Charfuelan Villarreal

Assessora Técnica da Diretoria de Energia

Luíza Delgado Vieira

Assessora da Diretoria de Energia

Ronnie Eustáquio Oliveira

Assessor da Diretoria de Energia

Adriel Lemos Ferreira

Estagiário da Diretoria de Energia



Coordenação Técnica

Maria Jose Charfuelan Villarreal

Autores

Adriel Lemos Ferreira

Luíza Delgado Vieira

Maria Jose Charfuelan Villarreal

Equipe Técnica

Gustavo Caetano Ribeiro de Melo – Diretor de Energia

Maria Jose Charfuelan Villarreal – Assessora Técnica da Diretoria de Energia

Luíza Delgado Vieira – Assessora da Diretoria de Energia

Ronnie Eustáquio Oliveira – Assessor da Diretoria de Energia

Adriel Lemos Ferreira – Estagiário da Diretoria de Energia

SUMÁRIO

01 Introdução.....	11
02 Integração com as Políticas Estaduais.....	14
2.1.PLAC-MG: Metas e indicadores de eficiência energética para o setor industrial.....	16
2.2. Estratégia de Transição Energética de Minas Gerais.....	18
03 Panorama da Indústria e do Consumo Elétrico em Minas Gerais	22
3.1. Principais Atividades Emissoras de GEE.....	23
3.2. Consumo de Energia Elétrica em Minas Gerais e Posição no Contexto Nacional..	26
3.3. Principais Setores Consumidores de Eletricidade na Indústria Mineira.....	31
3.4. Intensidade Elétrica do Setor Industrial.....	36
04 Mapeamento Setoriais	41
4.1. Indústria de Metais	43
4.2. Produtos Minerais	46
4.2.1. Cimento.....	48
4.2.2. Cal	51
4.3. Indústria Química	52
05 Mapeamento de Políticas e Iniciativas	
Existentes.....	54
5.1. Políticas e Iniciativas Existentes no Brasil e em Minas Gerais.....	55
5.2. Programas de Eficiência Energética da CEMIG.....	57
5.3. Bando de Desenvolvimento de Minas Gerais - BDMG	59
06 Oportunidades de Eficiência Energética na Indústria Mineira.....	63
6.1. Gestão de Energia e Gestão de Processos	65
6.2. Adoção de Novas Tecnologias	67
6.3. Digitalização e Automação de Processos	68
6.4. Eletrificação Industrial	69
6.5. Retrofit com Foco em Eficiência Energética	70
07 Conclusão	73
Referências	76

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Emissões e remoções de GEE	24
Gráfico 2. Emissão Efetiva por Categoria Emissora de Processos Industriais	25
Gráfico 3. Distribuição das Emissões por Subcategoria de Processos Industriais (2015-2023)	26
Gráfico 4. Consumo de energia elétrica total de Minas Gerais (2015-2024)	27
Gráfico 5. Distribuição do consumo de energia elétrica por setor (Brasil x Minas Gerais, 2015-2024)	28
Gráfico 6. Ranking dos principais consumidores de eletricidade no setor industrial (2024)	29
Gráfico 7. Fluxo energia elétrica em Minas Gerais em GWh (2024)	30
Gráfico 8. Evolução do consumo industrial por setor (2015-2024)	33
Gráfico 9. Estrutura do consumo industrial de eletricidade (2024)	34
Gráfico 10. PIB Estadual (valor adicionado a preços básicos) - indústria (preços de 2010)	36
Gráfico 11. Consumo Elétrico e Valor Adicionado das Indústrias em Minas Gerais	38
Gráfico 12. Evolução Intensidade Elétrica MG x Brasil (MWh/10 ³ U\$ppp [2010])	39
Gráfico 13. Matriz Elétrica da Indústria da Mineração (TWh)	43
Gráfico 14. Evolução das Emissões de Gases do Efeito Estufa em toneladas de carbono (tCO ₂) na indústria de metais – Minas Gerais	44
Gráfico 15. Capacidade Instalada em Autoprodutores na Indústria de Metais	45
Gráfico 16. Capacidade Instalada em Autoprodutores na Indústria de Minerais	47
Gráfico 17. Evolução da Emissão de Gases do Efeito Estufa na Indústria do Cimento em Minas Gerais em (tCO ₂ e)	49
Gráfico 18. Capacidade Instalada em Autoprodutores na Indústria de Cimento (MW)	50
Gráfico 19. Evolução da Emissão de Gases do Efeito Estufa na Indústria da Química em Minas Gerais em (tCO ₂ e)	53
Gráfico 20. Investimento por Subprograma do PEE	57
Gráfico 21. Economia de energia proporcionada pelos projetos de eficiência realizados viabilizados pela Cemig (GWh)	58
Gráfico 22. Evolução desembolsos com eficiência energética pelo BDMG (R\$ milhões)	59

Lista de Figuras

Figura 1. Oportunidades de Eficiência Energética para o Setor Industrial	65
Figura 2. PDCA do Sistema de Gestão de Eficiência Energética	66
Figura 3. Mecanismo de Adoção de Novas Tecnologias	67

Lista de Tabelas

Tabela 1. Ações, Metas e Indicadores do Setor Industrial (PLAC-MG)	17
Tabela 2. Características Energéticas e Potenciais de Eficiência por Setor Industrial	19
Tabela 3. Consumo histórico desagregado dos principais consumidores no setor industrial (MWh)	32
Tabela 4. Desembolso em eficiência energética pelo BDMG em 2024 em R\$ milhões	60
Tabela 5. Linhas de crédito BDMG	61

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

AFOLU – Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BDMG – Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais
BEN – Balanço Energético Nacional
CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCUS – Captura, Uso e Armazenamento de Carbono (Carbon Capture, Utilization and Storage)
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
DRI-H ₂ – Redução Direta a Hidrogênio (Direct Reduced Iron with Hydrogen)
EAF – Fornos Elétricos a Arco
EE – Eficiência Energética
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
ESG – Ambiental, Social e Governança (Environmental, Social and Governance)
FIEMG – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
FINAME – Linha de crédito para financiamento de máquinas e equipamentos
GEE – Gases de Efeito Estufa
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IE – Intensidade Energética
IEA – Agência Internacional de Energia (International Energy Agency)
IPPU – Processos Industriais e Uso de Produtos
LBE – Linha de Base Energética
MOE – Eletrólise de Óxidos Fundidos (Molten Oxide Electrolysis)
NDC – Contribuição Nacionalmente Determinada
PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

PDCA – Planejar, Fazer, Checar e Agir (Plan-Do-Check-Act)
PEE – Programa de Eficiência Energética (ANEEL)
PEMC – Plano de Energia e Mudanças Climáticas
PETE – Política Estadual de Transição Energética
PNEf – Plano Nacional de Eficiência Energética
PLAC-MG – Plano de Ação Climática de Minas Gerais
PPC – Paridade de Poder de Compra
PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROESCO – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SCADA – Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (Supervisory Control and Data Acquisition)
SEDE – Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico
SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SGEE – Sistema de Gestão de Eficiência Energética
SIRENE – Sistema de Registro Nacional de Emissões
VA – Valor Adicionado
VAB – Valor Adicionado Bruto
VBPI – Valor Bruto da Produção Industrial
WHR – Recuperação de calor residual (Waste Heat Recovery)



01 INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

A eficiência energética (EE) representa um dos eixos estratégicos da transição energética em Minas Gerais, articulando competitividade industrial, sustentabilidade e segurança do suprimento. No estado, a indústria responde por aproximadamente 54% do consumo total de energia elétrica, o maior entre os setores econômicos (EPE, 2025), e figura como o quarto maior emissor de Gases de Efeito Estufa (GEE), atrás de Agricultura, Florestas e Outros Usos da Terra (AFOLU) e do setor de energia (SEEG, 2024). Esse perfil reforça a relevância de políticas e programas voltadas à modernização de processos produtivos, à redução de perdas e à incorporação de tecnologias de baixo carbono no parque industrial mineiro.

No cenário nacional, o Atlas de Eficiência Energética, 2024, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), aponta que o Brasil se tornou 11,8% mais eficiente energeticamente desde 2005, com avanços significativos no setor residencial e de transportes, mas, ainda, com desafios na indústria. A intensidade energética da indústria, que mede o uso de energia por unidade de produto (valor agregado), apresenta um incremento na última década, refletindo o peso de segmentos energointensivos, como siderurgia, cimento e química, não refletindo necessariamente a uma diminuição da eficiência energética.

Em Minas Gerais, esses setores energointensivos concentram parte significativa da base produtiva e são determinantes para o desempenho energético e econômico regional. Esse cenário é reforçado pelo resultado da intensidade elétrica do estado, que, assim como o Brasil, registrou um incremento, sendo este ainda mais expressivo.

Em paralelo, análises da Agência Internacional de Energia (IEA, 2025) indicam que o ritmo global de melhoria da eficiência industrial desacelerou para 0,2% ao ano entre 2019 e 2023. Regiões como a União Europeia e o Leste Asiático, entretanto, mantiveram avanços mais expressivos, impulsionados por políticas de reindustrialização verde e pela eletrificação de processos produtivos.

No Brasil e na América do Sul, a intensidade energética industrial aumentou cerca de 1,3% ao ano no mesmo período, o que evidencia estagnação e reforça a urgência de instrumentos que contribuam à recuperação da eficiência. Trata-se também de um desafio para o estado de Minas Gerais, que pode se tornar em uma oportunidade para reposicionar o estado como referência nacional em eficiência e gestão energética industrial.

A trajetória recente de investimentos em Pesquisa & Desenvolvimento, reforça esse potencial. Segundo a plataforma Inova-E (EPE, 2025), os investimentos em tecnologias de eficiência energética no país ultrapassaram R\$7,6 bilhões em 2024, com destaque em biocombustíveis. O cenário evidencia a sinergia entre inovação tecnológica e eficiência, sobretudo quando associada às políticas públicas estaduais, como o PLAC-MG e as iniciativas federais, como o Procel Indústria e o Programa de Eficiência Energética (PEE/ANEEL).

A metodologia deste estudo baseia-se na análise integrada de dados secundários oriundos de bases oficiais, como EPE, CCEE, ANEEL, SEEG, SIRENE, FIEMG, CEMIG e IBGE, e no benchmarking de programas e políticas nacionais e internacionais. A partir da sistematização desses dados e da revisão de experiências bem-sucedidas, buscou-se identificar oportunidades de ganho de eficiência e instrumentos de apoio existentes, conectando evidências técnicas às diretrizes estratégicas do Estado de Minas Gerais.

O objetivo geral deste documento é analisar o panorama da eficiência energética na indústria mineira, com ênfase no uso da energia elétrica, e identificar caminhos concretos para ampliar a produtividade e reduzir a intensidade energética do setor. Busca-se, assim, subsidiar políticas públicas e decisões empresariais que fortaleçam a competitividade industrial e apoiem o cumprimento das metas de transição energética e descarbonização de Minas Gerais.

Este documento dá continuidade à série iniciada com o Guia de Eficiência Energética para Prédios Públicos (SEDE-MG, 2025), expandindo o escopo para o setor industrial, com foco em três eixos principais:

1. Diagnóstico do consumo de energia elétrica e intensidade elétrica da indústria no estado de Minas Gerais;
2. Oportunidades e tecnologias para eficiência energética;
3. Instrumentos de política, financiamento e inovação.

O presente estudo pretende adotar um olhar analítico e propositivo às oportunidades para o estado; avançar rumo a uma indústria com ganhos de produtividade a partir de ações de eficiência e sustentabilidade.

A estrutura do documento foi organizada para oferecer uma visão integrada entre diagnóstico, políticas e ações. O Capítulo 2 apresenta a integração com as políticas estaduais, as metas do PLAC-MG e a Estratégia de Transição Energética de Minas Gerais; o Capítulo 3 analisa o panorama da indústria e do consumo energético mineiro, destacando a intensidade elétrica do setor; os Capítulos 4 e 5 mapeiam os setores mais intensivos em energia e as políticas e programas de apoio existentes; enquanto o Capítulo 6 aborda as tecnologias, oportunidades e recomendações estratégicas para o avanço da eficiência energética industrial.

Eficiência energética não é apenas economia de energia: é um vetor de competitividade e desenvolvimento tecnológico que pode redefinir o papel de Minas Gerais na nova economia verde.

02 Integração com as Políticas Estaduais



Integração com as Políticas Estaduais

A agenda de eficiência energética industrial em Minas Gerais está ancorada em um conjunto de instrumentos de planejamento que, ao longo da última década, vêm estruturando a transição energética e climática do Estado. Esse capítulo apresenta como o Plano de Ação Climática de Minas Gerais (PLAC-MG) e a Estratégia de Transição Energética (FEAM, 2021) conforme bases institucionais e técnicas que orientam metas, diretrizes e oportunidades relacionadas à modernização do parque industrial e ao uso eficiente da energia.

O Plano de Ação Climática de Minas Gerais (PLAC-MG) é o principal direcionador de metas e ações voltadas à descarbonização da economia estadual. O plano define indicadores e compromissos por setor e, transversalmente, articula o setor energético com diversas cadeias produtivas, reconhecendo seu papel estruturante na transição para uma economia de baixo carbono.

No PLAC-MG (MINAS GERAIS, SEMAD, 2024), a eficiência energética é tratada como uma medida prioritária de curto e médio prazo e como um eixo transversal para a indústria. Ela é essencial para reduzir emissões ao menor custo até 2050 e para aliviar pressões sobre o sistema elétrico, cuja expansão de fontes renováveis já altera significativamente o comportamento da rede e exige soluções de armazenamento e gestão da demanda.

Essa abordagem reforça que, a eficiência energética não se limita à economia de energia, mas constitui um vetor de competitividade e inovação tecnológica, capaz de elevar a produtividade do parque industrial e ampliar a segurança energética do Estado.

Complementarmente, a Estratégia de Transição Energética de Minas Gerais (FEAM, 2021) fornece o arcabouço técnico de médio e longo prazo para orientar políticas setoriais. A partir de modelagens energéticas e de cenários alinhados às metas nacionais da NDC, o estudo propõe caminhos para a expansão das energias renováveis, o fortalecimento da eficiência energética e a futura institucionalização da Política Estadual de Transição Energética (PETE). As metas de eficiência de 10% até 2030 e 15% até 2050, destacadas na Estratégia, reforçam a centralidade da modernização industrial e da gestão otimizada da energia no horizonte de longo prazo.

Assim, este estudo intitulado “Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria de Minas Gerais” se insere como um instrumento técnico de diagnóstico e suporte à implementação das políticas climáticas estaduais, oferecendo análises que reforçam o eixo de eficiência energética industrial previsto no PLAC-MG.

2.1. PLAC-MG: metas e indicadores de eficiência energética para o setor industrial

O setor industrial é um dos pilares da estratégia de descarbonização definida no Plano de Ação Climática de Minas Gerais (PLAC-MG), tanto por sua relevância econômica quanto pela intensidade de seu consumo energético e pelas emissões associadas. O documento identifica a indústria como um dos segmentos de maior potencial para a redução de emissões de GEE, com destaque para os ganhos de eficiência energética, a substituição de insumos e combustíveis fósseis e a adoção de tecnologias de baixo carbono (MINAS GERAIS, SEMAD, 2024).

O PLAC-MG reconhece a eficiência energética como uma das principais medidas de mitigação de custo reduzido, capaz de gerar impactos significativos em subsetores como siderurgia, cimento, química e alimentos e bebidas, que concentram parcela expressiva das emissões industriais do Estado. No PLAC-MG destaca-se ainda que melhorias em processos térmicos e elétricos, modernização de motores e sistemas de controle e valorização da energia residual podem representar uma fração relevante do potencial de abatimento até 2050 (MINAS GERAIS, SEMAD, 2024).

Essas diretrizes se materializam em um conjunto de metas e indicadores voltados à elevação da eficiência e à redução da intensidade energética da indústria mineira. Na Tabela 1, apresentam-se os principais destaques relacionados a essas metas e seus objetivos estratégicos:

Tabela 1. Ações, Metas e Indicadores do Setor Industrial (PLAC-MG)

Ação ou meta alinhada ao PLAC	Indicadores Principais	Objetivo Estratégico
Ampliação da eficiência energética	Economia de energia elétrica (ΔE) acumulada em GWh por projetos de EE da CEMIG; Desembolso do BDMG em linhas de crédito verdes para a indústria.	Reduzir o consumo e a intensidade energética do setor industrial.
Ampliação da eficiência energética	Quantidade de estudos, programas e instrumentos elaborados/apoiados e criação do Painel de Indicadores de EE na indústria.	Fortalecer a base técnica e institucional para a implementação das ações de eficiência energética.
Desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono	Percentual de execução do <i>Roadmap Setorial da Indústria</i> e nº de ações de incentivo para hidrogênio.	Promover a modernização tecnológica e reduzir emissões associadas ao uso de energia.
Fomentar cogeração com fonte não fóssil e a energia residual na indústria	Potência outorgada de cogeração qualificada e de autogeração ou autoconsumo remoto no estado.	Ampliar o aproveitamento de energia residual e o uso eficiente de calor de processo.
Substituição de combustíveis e materiais por insumos alternativos	Fator de clínquer na produção de cimento, volume de gás distribuído para siderúrgicas, nº de siderúrgicas que utilizam gás, número de refinarias que produzem hidrogênio e produção/distribuição de biometano.	Substituir combustíveis intensivos em carbono e diversificar a matriz energética industrial.

Fonte: Elaboração própria - (MINAS GERAIS, SEMAD, 2024).

As metas e indicadores do PLAC-MG evidenciam que a eficiência energética industrial é simultaneamente uma estratégia de mitigação climática e um instrumento de fortalecimento da competitividade econômica do Estado. O alinhamento entre o planejamento energético e as políticas de baixo carbono cria as bases de um desenvolvimento produtivo, no qual a modernização tecnológica, a gestão eficiente da energia e o uso de fontes limpas se convertem em pilares da transição mineira para uma economia mais sustentável.

Por fim, o acompanhamento dos indicadores pode ser realizado por meio da plataforma MRV Climático.

2.2 Estratégia de Transição Energética de Minas Gerais

Minas Gerais já demonstra protagonismo na transição energética desde 2015, com o lançamento do Plano de Energia e Mudanças Climáticas (PEMC), referência entre governos subnacionais. O Plano foi elaborado como resposta aos riscos associados às mudanças climáticas e apresenta estratégias, diretrizes e ações setoriais de mitigação abrangendo os setores de energia, agricultura, AFOLU, transportes, indústria e resíduos.

O Plano reúne um conjunto abrangente de estudos e diagnósticos que fundamentam suas diretrizes e propostas, incluindo o Sumário Executivo, Desafios e Oportunidades Regionais, Potencial de Eficiência Energética com Enfoque Setorial, Estratégia de Adaptação Regional das Mudanças Climáticas para Minas Gerais, além dos volumes I e II do Potencial de Energias Renováveis. Também integram o documento o Estudo de Vulnerabilidade Regional às Mudanças Climáticas, o eixo de Adaptação e Recursos Naturais, o Diagnóstico de Arranjos Institucionais e Governança, bem como análises específicas dos setores AFOLU, Energia, Resíduos e Efluentes, Transporte e Indústria. Complementando esse arcabouço técnico, o plano incorpora o 3º Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa (ano-base 2014), que oferece a base de emissões necessária para orientar ações de mitigação e adaptação no estado.

Nesse contexto, as ações setoriais para a indústria levantadas no Plano são:

- Programa Estadual de Eficiência Energética (discutido na seção 5.3);
- Proposta de diferenciação tributária para tecnologias de baixo carbono;
- Fomento à cogeração industrial;
- Substituição gradual de fontes energéticas com alto fator de emissão de GEE;
- Análise simbiótica entre produtos industriais e os fluxos envolvidos.

A Tabela abaixo resume as análises e conclusões do plano:

Tabela 2. Características Energéticas e Potenciais de Eficiência por Setor Industrial

Uso da Energia	Potencial de EE	Barreiras associadas	Conclusões
Siderurgia			
Altamente intensivo em energia térmica; predominam coque, carvão vegetal e eletricidade	• Recuperação de calor de gases de processo. • Melhorias em fornos, sistemas térmicos e laminação. • Potenciais também em motores elétricos e força motriz.	• Alto custo de capital e risco tecnológico na modernização de grandes equipamentos. • Pequenas unidades têm menor capacidade técnica e menos acesso a financiamento. • Linhas de crédito disponíveis pouco utilizadas por burocracia e custos transacionais.	• É o subsetor com maior potencial de redução energética entre os analisados. • Avanços dependem de apoio técnico, incentivos e modernização tecnológica.
Cimento			
Majoritariamente térmico, com foco na clínquerização.	• Maior potencial na etapa de clínquerização e substituição térmica. • Uso de adições reduz demanda energética por clínquer.	• Limitações operacionais: poucas paradas programadas dos fornos. • Projetos têm retorno financeiro mais lento devido ao baixo custo energético.	• MG possui parque moderno (predomínio de via seca). • Ainda assim, mantém potencial relevante, especialmente no clínquer.

**Tabela 2. Características Energéticas e Potenciais de Eficiência por Setor Industrial
(Continuação)**

Ferro-ligas			
Muito intensivo em eletricidade; fornos elétricos predominam	• Considerável nos fornos elétricos (controle térmico, refratários, automação). • Potencial na recuperação de calor e otimização de força motriz.	• Tarifa elétrica elevada compromete competitividade e investimentos. • Modernização de fornos é cara e envolve risco operacional. • Pequenas empresas têm menor acesso a novas tecnologias.	• Subsetor altamente intensivo e com grande potencial técnico. • Melhoria depende de inovação tecnológica e condições energéticas favoráveis.
Mineração			
Eletricidade em moagem/bombeamento ; diesel no transporte.	• Relevante em motores elétricos, sistemas de bombeamento e ventilação. • Ganhos possíveis com automação, variadores de velocidade e otimização de logística.	• Modernização de equipamentos móveis é cara. • Operações contínuas dificultam interrupções para retrofit. • Linhas de financiamento pouco acessadas.	• Subsetor muito relevante para MG, com elevado consumo elétrico. • Potenciais dependem de renovação tecnológica e soluções de gestão energética.

Fonte: Elaboração própria - (FEAM, 2015)

A Tabela 2 mostra que a eficiência energética na indústria mineira é uma das principais oportunidades para reduzir de custos, aumento de competitividade e mitigação de emissões. Setores intensivos em energia, como siderurgia, cimento, ferro-ligas e mineração, apresentam potencial significativo de ganhos por meio da modernização de processos, recuperação de calor, substituição de equipamentos obsoletos, automação e ampliação de sistemas de cogeração.

Medidas como otimização de fornos, melhoria de sistemas térmicos, utilização de motores de alta eficiência e automação podem gerar economias expressivas no curto e médio prazo. Apesar desse potencial, ainda existem barreiras relevantes, como altos custos iniciais de investimento, dificuldades de acesso a crédito, percepção de risco quanto ao retorno e limitada interrupções operacionais para retrofit (FEAM, 2015).

Já em 2021, a FEAM publicou a Estratégia de Transição Energética de Minas Gerais, documento que orienta o Estado no cumprimento das metas do setor energético previstas na primeira NDC brasileira. A partir de uma modelagem de cenários em médio e longo prazo, a Estratégia delimita o papel de Minas Gerais, especialmente no que tange ao avanço das fontes renováveis e à promoção da EE. A partir da análise de cenários, busca-se facilitar a tomada de decisões e, finalmente, chegar à Política Estadual de Transição Energética – PETE.

O documento, publicado em 2021, estabeleceu metas de transição energética para o horizonte 2030–2050, alinhadas aos compromissos do Estado na contribuição à NDC brasileira. Entre essas metas, destaca-se a de eficiência energética no setor elétrico, que estabelece a meta de obtenção de 10% de ganhos até 2030 e 15% até 2050.

Em resumo, a EE é um dos pilares estratégicos para reduzir emissões, aumentar a competitividade industrial e apoiar a transição energética em Minas Gerais (FEAM, 2021). É um caminho de ótimo custo-benefício, visando a redução de emissões, já que apresenta menor custo por tCO₂ evitada, reduz a necessidade de expansão da infraestrutura elétrica e aumenta a competitividade das empresas mineiras.

Por fim, ao reduzir custos operacionais, modernizar processos e gerar empregos técnicos, a EE fortalece a competitividade econômica, reduz desigualdades regionais, diminui vulnerabilidade climática e contribui para metas de descarbonização sem onerar consumidores.



03 **Panorama da** **Indústria e do** **Consumo Elétrico** **em Minas Gerais**

Panorama da Indústria e do Consumo Elétrico em Minas Gerais

Minas Gerais possui um parque industrial de grande porte e fortemente integrado às cadeias nacionais de mineração, siderurgia, produtos de minerais não metálicos, química, papel e celulose, alimentos e outros ramos manufatureiros. Muitos desses segmentos utilizam processos eletrointensivos, tornando a energia elétrica um insumo estratégico para a competitividade e para a trajetória de desenvolvimento do estado.

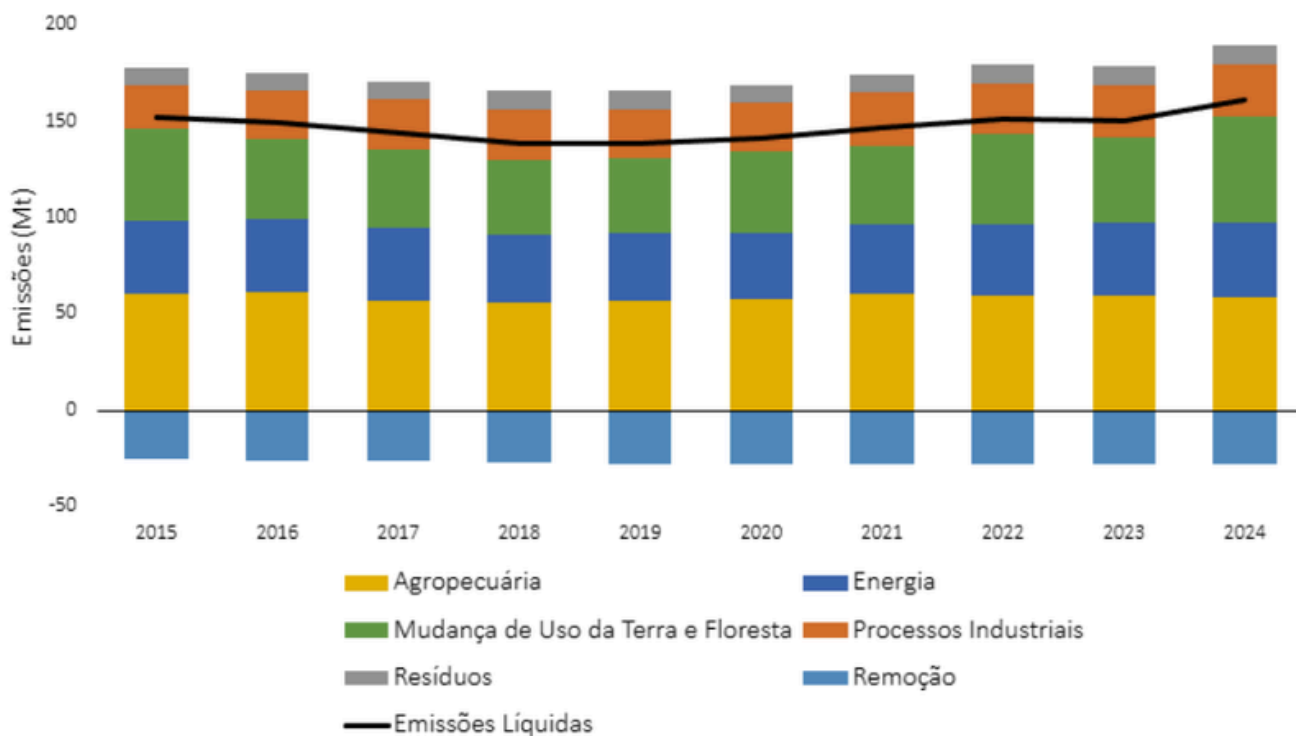
No Brasil, a indústria responde pela maior parcela do consumo de eletricidade, à frente dos segmentos residencial, comercial e do poder público. Em Minas Gerais, esse padrão se intensifica, com um peso relativo da indústria no consumo total ainda superior à média nacional, refletindo a própria estrutura produtiva do estado.

Este capítulo detalha a estrutura e a contribuição da indústria nas emissões estaduais, o consumo de energia elétrica em Minas Gerais e a posição do estado no cenário nacional.

3.1 PRINCIPAIS ATIVIDADES EMISSORAS DE GEE

As emissões de GEE estufa em Minas Gerais refletem a estrutura econômica do estado, destacando especialmente o peso dos setores energético, industrial e agropecuário. O Gráfico 1 apresenta a distribuição de GEE emitidos por setor entre 2015 e 2024, e permite identificar quais são as principais fontes emissoras.

Gráfico 1. Emissões e remoções de GEE



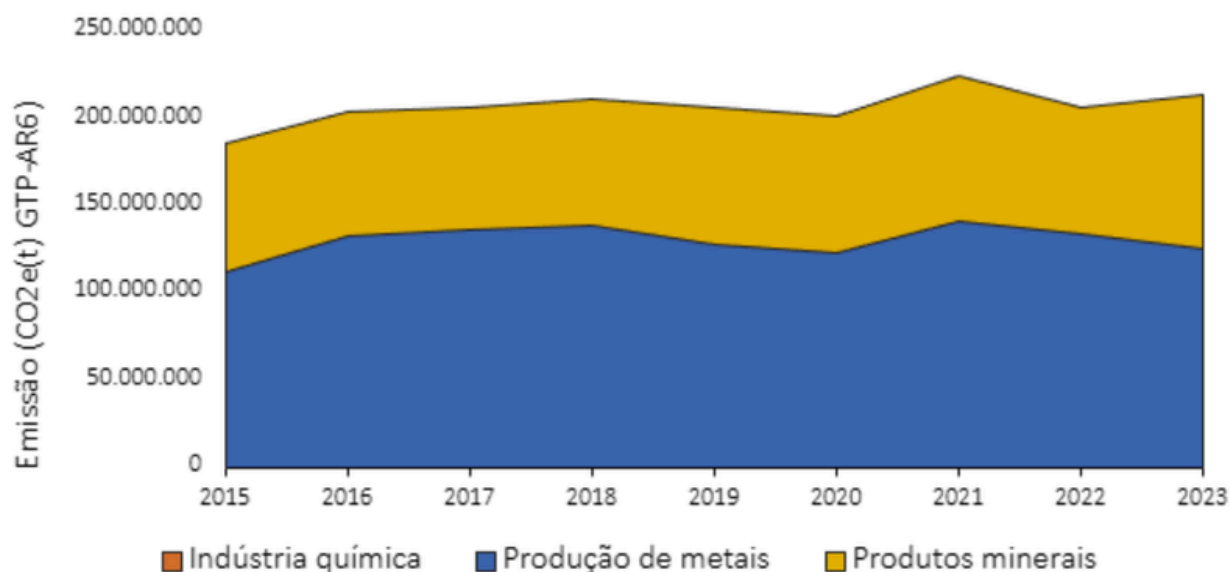
Fonte: Elaboração própria (SEEG, Observatório do Clima, 2024/v12.0).

No gráfico, observa-se a distribuição relativamente estável das emissões ao longo do período, com agropecuária, energia e AFOLU respondendo consistentemente pela maior parcela das emissões brutas. Em 2024, a agropecuária representou aproximadamente 31,1% das emissões, seguida por AFOLU (29,1%), energia (20,4%) e processos industriais (14,2%). Embora não seja o maior emissor, a indústria mantém uma participação constante e expressiva, desempenhando papel relevante na agenda de mitigação. Já o setor de resíduos permanece em torno de 5,2%, enquanto o componente de remoção segue como valor negativo, apresentando incremento ao longo do período.

A contribuição da indústria é particularmente estratégica porque suas emissões estão diretamente associadas a processos produtivos passíveis de modernização tecnológica, maior eficiência energética e substituição de insumos. Assim, orientações específicas para o setor tornam-se essenciais, uma vez que ganhos de eficiência reduzem emissões e, simultaneamente, fortalecem a competitividade industrial.

Após contextualizar a relevância do setor industrial no conjunto das emissões estaduais, a seguir aprofunda-se sua análise interna, observando como as emissões se distribuem entre as principais categorias produtivas. O Gráfico 2 apresenta a evolução das emissões industriais por segmento entre 2015 e 2023.

Gráfico 2. Emissão Efetiva por Categoria Emissora de Processos Industriais



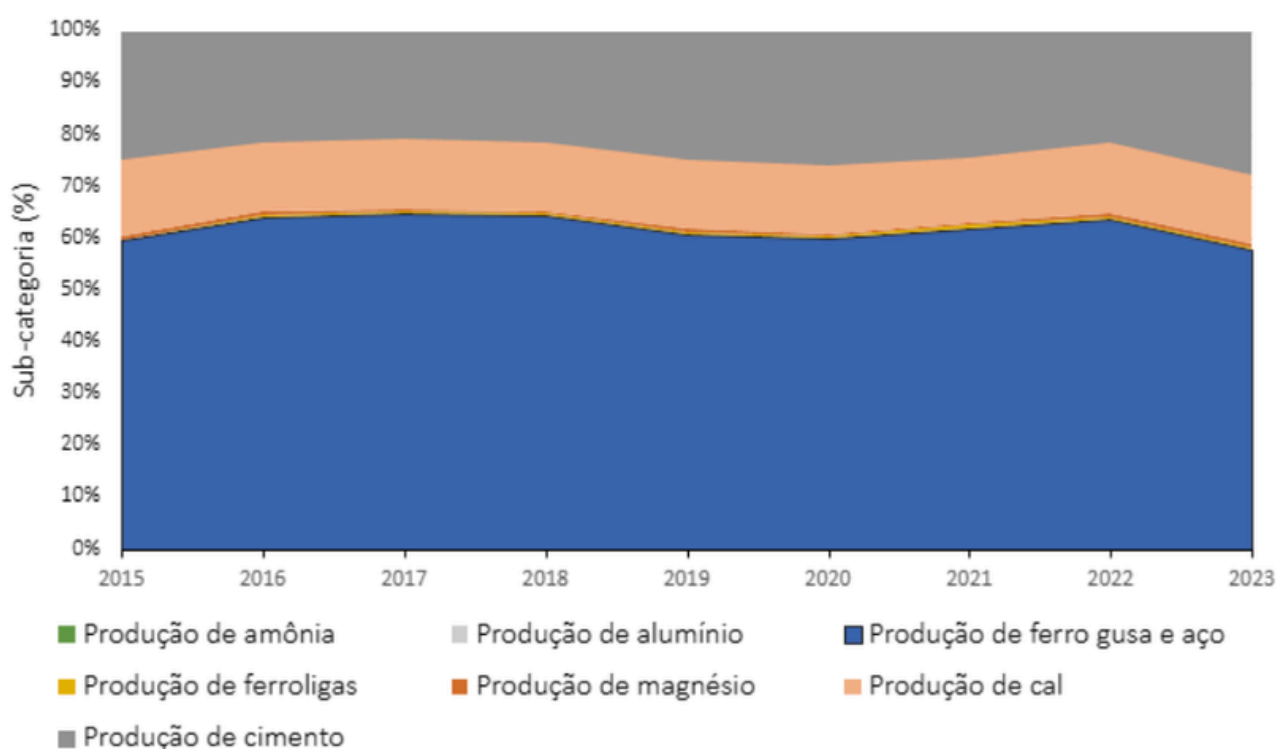
Fonte: Elaboração própria (SEEG, Observatório do Clima, 2024/v12.0).

O Gráfico 2 mostra que, no setor industrial mineiro, a produção de metais é a principal responsável pelas emissões ao longo de todo o período analisado, mantendo volumes elevados e relativamente estáveis. Os produtos minerais aparecem como a segunda maior fonte, enquanto a indústria química não se mostra significativa e representa a menor contribuição.

No conjunto, evidencia-se que as emissões industriais de Minas Gerais se concentram nos segmentos mais intensivos em energia térmica, reforçando a necessidade de inovações voltadas à eficiência dos processos de calor, incluindo modernização de fornos, recuperação de calor e, quando tecnicamente viável, a eletrificação parcial de etapas térmicas. Essas oportunidades e seus potenciais serão detalhados no Capítulo 4, dedicado ao mapeamento setorial.

Por fim, aprofunda-se a análise observando como essas emissões se distribuem entre as principais subcategorias industriais. O Gráfico 3 apresenta essa evolução para segmentos como cimento, cal, magnésio, ferroligas, ferro-gusa e aço, alumínio e amônia.

Gráfico 3. Distribuição das Emissões por Subcategoria de Processos Industriais (2015-2023)



Fonte: Elaboração própria (SEEG, Observatório do Clima, 2024/v12.0).

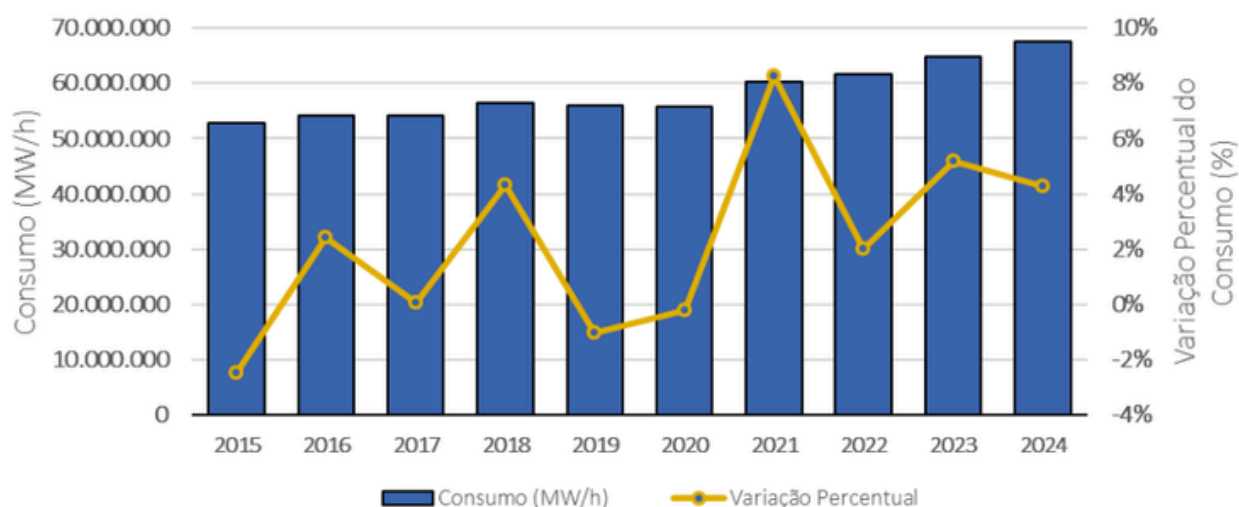
As emissões para produção de cimento, cal e ferro gusa e aço respondem por quase toda contribuição das emissões do setor de processos industriais em Minas Gerais, com o segmento de ferro-gusa e aço predominando ao longo de todo o período analisado. As demais atividades industriais, como produção de magnésio, ferroligas, alumínio e amônia, têm contribuição significativamente menor. De forma geral, observa-se que três segmentos concentram praticamente toda a emissão industrial no estado, reforçando que ações de mitigação e eficiência devem priorizar esses subsetores mais intensivos em emissões.

3.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM MINAS GERAIS E POSIÇÃO NO CONTEXTO NACIONAL

Antes de abordar os aspectos específicos relacionados à economia de energia e aos indicadores de eficiência energética, é importante analisar a tendência do consumo de energia no estado. Isso porque a busca pela eficiência energética pressupõe a adoção de medidas que permitam reduzir o consumo sem comprometer, e preferencialmente ampliando, os níveis de produção. Nesse contexto, esta seção dedica-se à análise do consumo de energia elétrica em Minas Gerais.

Para situar o papel de Minas Gerais, parte-se da evolução recente do consumo total de eletricidade no estado. No Gráfico 4, apresenta-se a trajetória do consumo de energia elétrica em Minas Gerais entre 2015 e 2024.

Gráfico 4. Consumo de energia elétrica total de Minas Gerais (2015-2024)

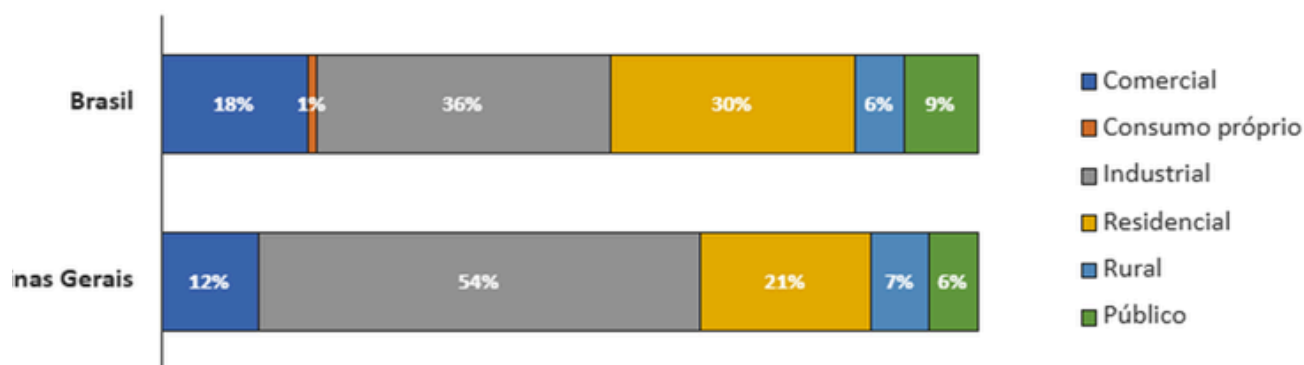


Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE, 2025.

O Gráfico 4 mostra que o consumo de eletricidade em Minas Gerais cresce ao longo da década, ainda que com oscilações anuais associadas a ciclos econômicos e choques conjunturais. Há períodos de maior expansão, momentos de relativa estabilidade e, mais recentemente, uma retomada mais forte após 2021. Em termos estruturais, a tendência é de aumento consistente da demanda, compatível com a relevância do parque industrial, da urbanização e da modernização dos serviços no estado.

Nesse sentido, também é importante comparar e contextualizar como a eletricidade é consumida por setor econômico no Brasil e em Minas Gerais. No Gráfico 5 apresenta-se a distribuição percentual do consumo de energia elétrica por setor no Brasil e em Minas Gerais considerando o período 2015 e 2024.

Gráfico 5. Distribuição do consumo de energia elétrica por setor (Brasil x Minas Gerais, 2015-2024)

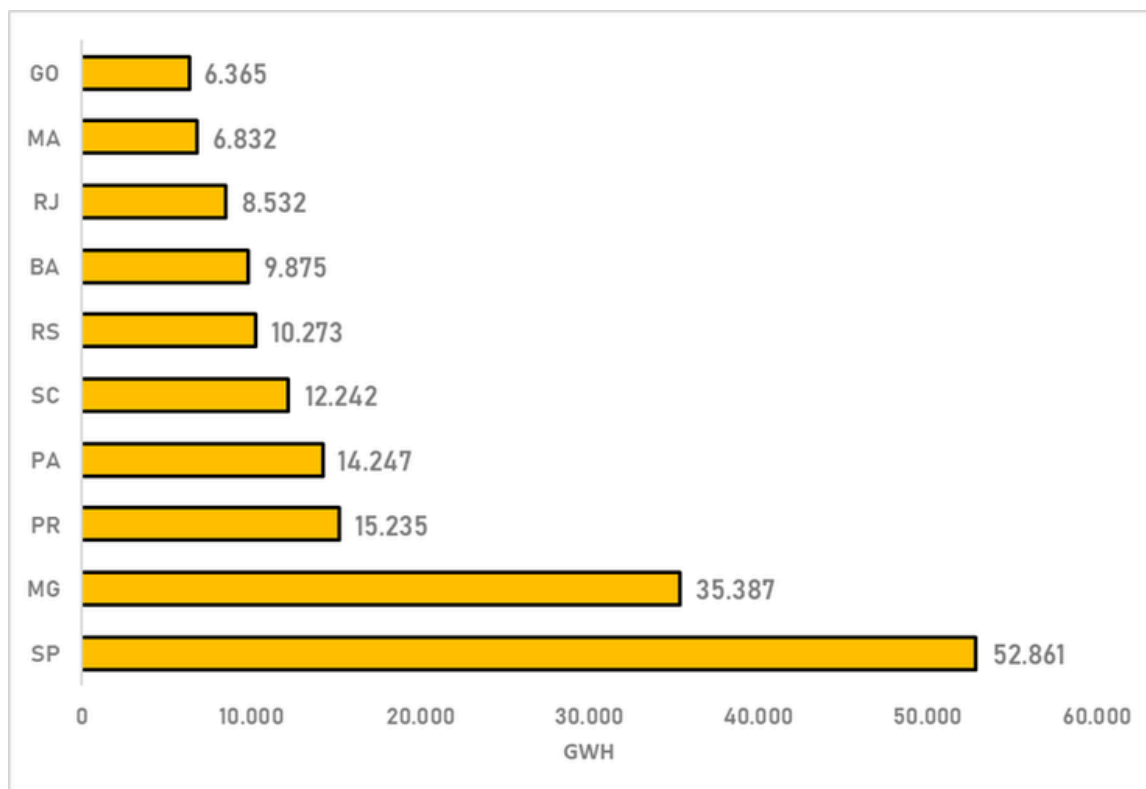


Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE, 2025.

A comparação evidencia que, no agregado nacional, o consumo industrial já possui peso expressivo, mas divide espaço com os segmentos residencial e comercial. Em Minas Gerais, a participação da indústria no consumo total é substancialmente maior, enquanto a fatia dos demais setores é menor. Ou seja, o Estado tem uma forte representação do setor industrial em termos de uso de eletricidade, sendo mais do que a média do país, reforçando a importância de focar a agenda de eficiência energética no setor industrial.

Considerando esse quadro mais geral, é importante observar como o consumo industrial de eletricidade se distribui entre os estados brasileiros. Nesse sentido, o Gráfico 6 apresenta o ranking dos principais consumidores de energia elétrica no setor industrial em 2024.

Gráfico 6. Ranking dos principais consumidores de eletricidade no setor industrial (2024)



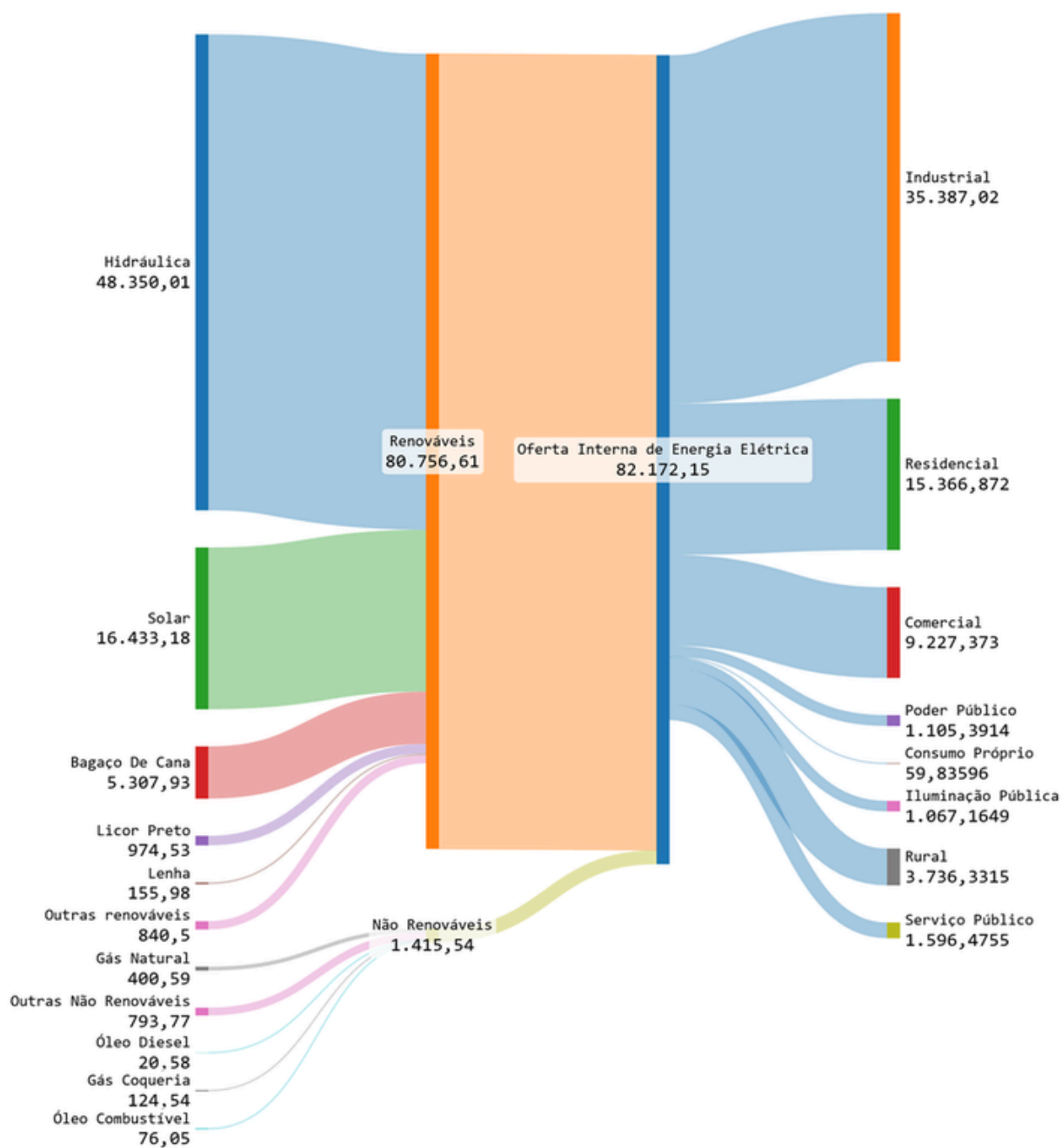
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE, 2025.

A partir desse ranking, observa-se forte concentração do consumo industrial em poucos estados, com destaque para São Paulo e Minas Gerais. A comparação entre os dados estaduais e nacionais da EPE indica que, em 2024, Minas Gerais representou cerca de 18% do consumo industrial de energia elétrica do país (EPE, 2025), como mostra o Gráfico 6.

Essa distribuição evidencia, ao mesmo tempo, o peso histórico e econômico da região Sudeste, sobretudo de SP e MG, e a heterogeneidade regional da demanda energética da indústria brasileira.

Além da posição de Minas Gerais no consumo industrial nacional, é importante compreender como a oferta de eletricidade se organiza internamente no estado e como essa energia é distribuída entre os diferentes segmentos de consumo final. Nesse sentido, o Gráfico 7 apresenta o fluxo de energia elétrica em Minas Gerais em 2024, da origem das fontes até os usos finais.

Gráfico 7. Fluxo energia elétrica em Minas Gerais em GWh (2024)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE, 2025.

O fluxo evidencia uma matriz elétrica fortemente renovável, com a maior parte da oferta interna de energia elétrica (cerca de 82 TWh) sendo abastecida por fontes renováveis, com destaque para a geração hidráulica e, em segundo plano, a solar e a biomassa (bagaço de cana, licor negro, lenha e outras renováveis). As fontes não renováveis (gás natural, óleo diesel, óleo combustível e outras) respondem por parcela relativamente pequena da oferta, reforçando o caráter limpo da matriz elétrica mineira.

Do lado da demanda, o diagrama confirma a predominância do setor industrial, que concentra a maior parte do consumo elétrico do estado, seguido pelos segmentos residencial e comercial. Os demais usos (poder público, serviços públicos, iluminação pública, meio rural e consumo próprio) aparecem com fatias menores, mas relevantes em termos de capilaridade territorial e prestação de serviços essenciais.

Esse quadro reforça dois pontos centrais para o presente estudo:

- Minas Gerais combina uma matriz elétrica majoritariamente renovável com um perfil de consumo fortemente industrial;
- Intervenções em eficiência energética na indústria têm potencial de gerar impactos significativos tanto sobre a demanda total quanto sobre a qualidade da transição energética no estado.

A partir desse panorama, o estudo atual passa a tratar diretamente do consumo industrial de energia elétrica em Minas Gerais, detalhando os principais setores responsáveis pela demanda e as oportunidades associadas à eficiência energética nas seções seguintes.

3.3 PRINCIPAIS SETORES CONSUMIDORES DE ELETRICIDADE NA INDÚSTRIA MINEIRA

A compreensão do consumo elétrico industrial em Minas Gerais exige observar como a demanda se distribui entre os principais ramos produtivos. Cada setor apresenta padrões próprios de uso de energia, associados ao tipo de processo, ao nível de automação, à intensidade tecnológica e ao porte das instalações. Identificar esses padrões permite reconhecer cadeias produtivas que concentram grande parte do consumo, bem como segmentos cuja participação vem crescendo nos últimos anos. Esse entendimento é fundamental para orientar iniciativas de eficiência energética alinhadas à estrutura industrial do estado.

A Tabela 3 apresenta o consumo anual de energia elétrica entre 2015 e 2024 para sete segmentos selecionados por sua relevância econômica, intensidade energética e representatividade no parque industrial mineiro: mineração, produtos de minerais não-metálicos, metalurgia, produtos químicos, produtos alimentícios, produtos de borracha e de material plástico e celulose, papel e produtos de papel. Os demais ramos foram agregados na categoria “demais setores”, permitindo uma visão consolidada da demanda elétrica total da indústria no estado.

Tabela 3. Consumo histórico dessagregado dos principais consumidores no setor industrial (MWh)

Ano	Mineração	Minerais Não-Metálicos	Metalurgia	Química	Alimentos	Borracha & Plástico	Papel & Celulose	Demais Setores
2015	6.670.476	2.378.918	8.439.422	2.562.485	2.033.281	570.736	315.513	5.112.532
2016	5.859.519	2.173.676	10.670.140	2.737.005	2.012.956	542.633	302.434	4.910.934
2017	5.818.967	2.073.901	10.801.233	2.458.055	2.045.185	571.240	294.741	5.006.107
2018	6.126.430	2.121.370	11.941.716	2.512.961	2.137.586	546.810	352.943	5.192.909
2019	5.159.331	2.162.221	11.730.028	2.482.027	2.161.633	543.472	264.819	5.173.213
2020	5.096.753	2.191.132	11.916.428	2.515.848	2.265.233	561.427	331.694	5.009.868
2021	5.963.926	2.388.587	12.724.438	2.729.670	2.448.269	592.600	365.336	5.682.974
2022	6.109.484	2.505.723	13.402.825	2.695.484	2.531.856	674.384	458.292	5.033.178
2023	6.508.949	2.594.819	13.707.430	2.536.572	2.683.541	670.570	558.625	4.919.749
2024	6.816.953	2.589.219	14.013.218	2.689.863	2.812.753	697.968	575.044	5.171.232

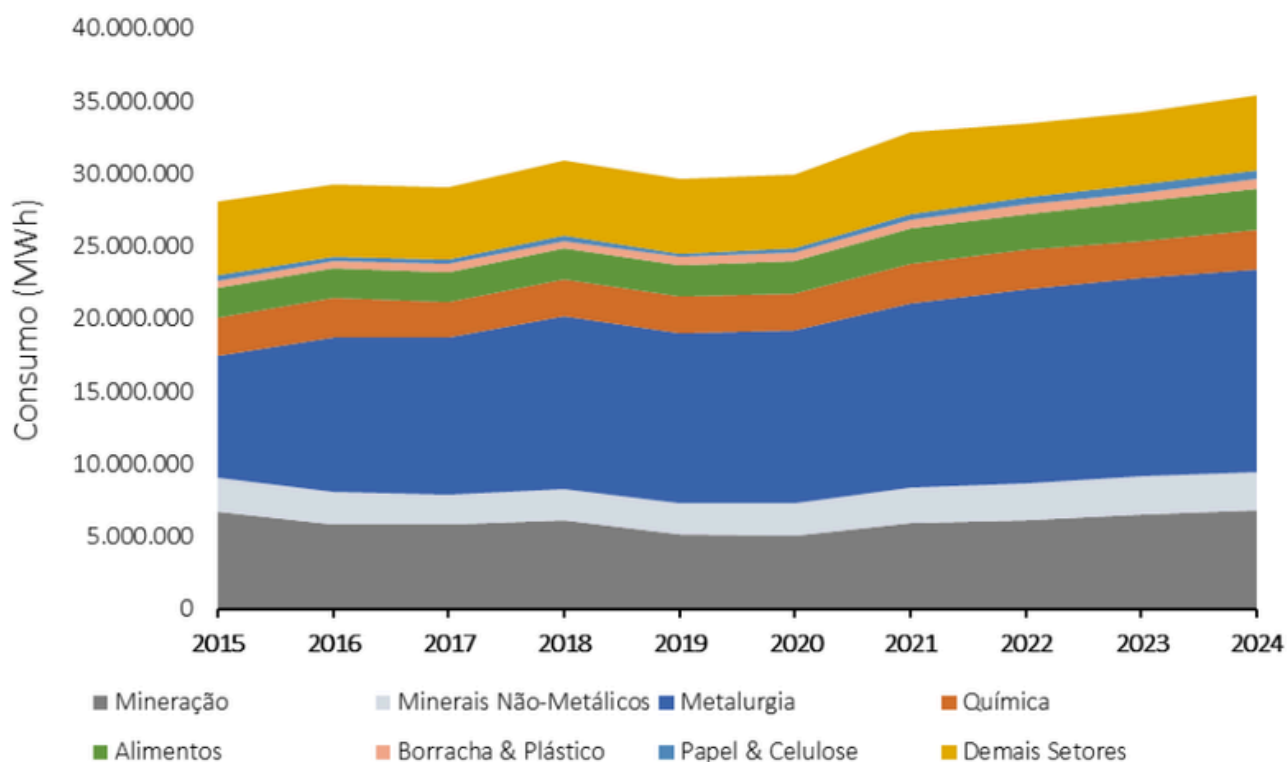
Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EPE, 2025.

A partir dos dados apresentados na Tabela 3, é possível aprofundar a interpretação da estrutura do consumo elétrico industrial por meio dos gráficos a seguir.

A base mensal da EPE segue a Classificação Nacional de Atividades Econômica, CNAE 2.0, na qual o consumo elétrico dos setores de cimento e cal não aparece desagregado. Ambas as atividades estão incluídas no grupo “produtos de minerais não-metálicos”, que também engloba cerâmica, vidro e outros ramos afins. Assim, ao longo deste capítulo, a análise desses subsetores é feita a partir do comportamento desse grupo agregado, explicando por que cimento e cal não surgem isoladamente nos gráficos. Esses setores serão detalhados posteriormente, dada sua relevância energética.

Para evidenciar como o consumo evoluiu ao longo da década, o Gráfico 8 apresenta a trajetória do consumo de eletricidade dos principais setores industriais entre 2015 e 2024. O gráfico permite visualizar simultaneamente o comportamento de cada segmento e as mudanças graduais na estrutura da demanda.

Gráfico 8. Evolução do consumo industrial por setor (2015-2024)



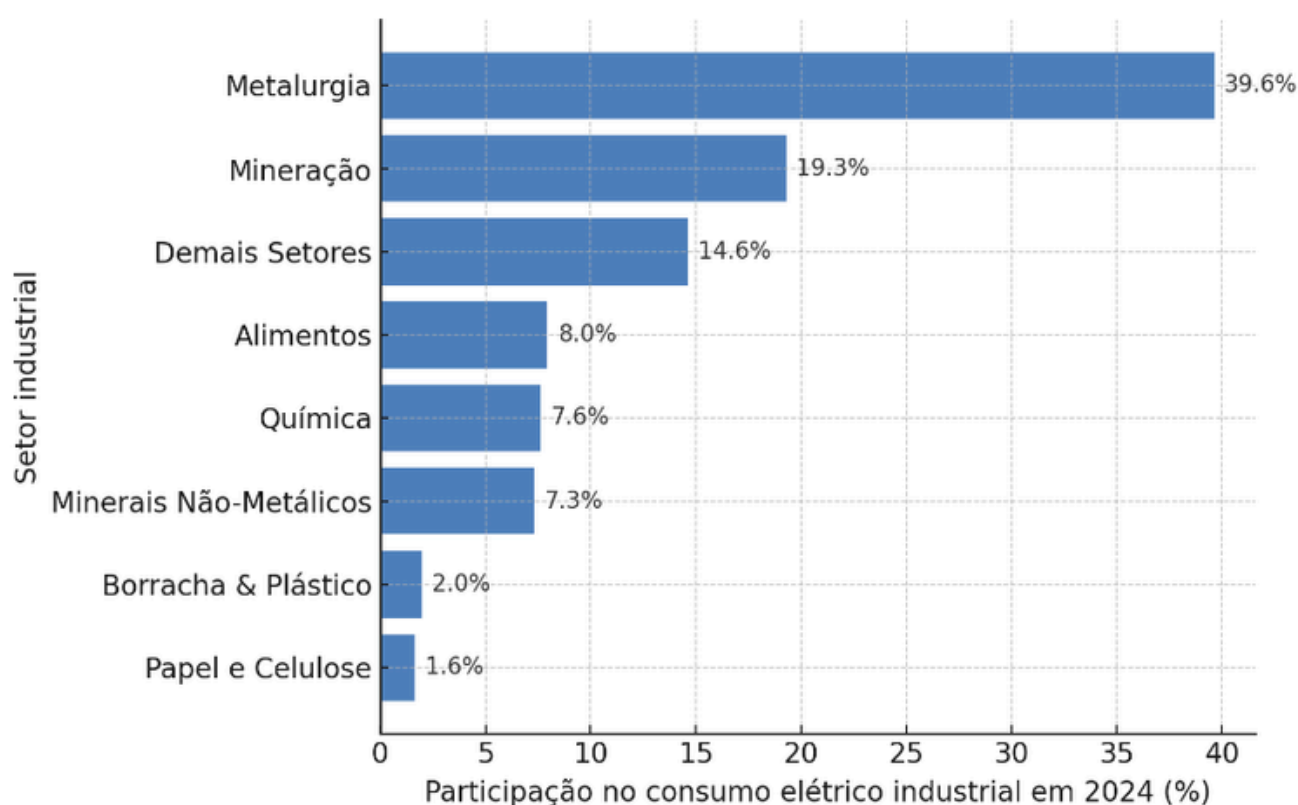
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE, 2025.

A evolução histórica mostra que a metalurgia se destaca consistentemente como o maior consumidor de eletricidade na indústria mineira, com aumento expressivo após 2021. A mineração mantém trajetória semelhante, reforçando a natureza eletrointensiva das operações de extração e beneficiamento mineral. O grupo de produtos de minerais não-metálicos, que inclui atividades como cimento, cal e cerâmica, apresenta estabilidade em patamar elevado.

Os setores de produtos químicos, alimentos, borracha e plásticos, e papel e celulose mostram crescimento gradual ao longo do período, indicando dinamismo em cadeias industriais de médio porte que ampliam progressivamente sua participação. Já a categoria “demais setores” perde relevância relativa, sugerindo uma concentração crescente da demanda em segmentos mais intensivos. No conjunto, o perfil revela uma estrutura industrial ancorada em cadeias eletrointensivas tradicionais, mas com expansão consistente de setores intermediários, especialmente alimentos, embalagens e papel/celulose.

O Gráfico 9 apresenta, por sua vez, a distribuição do consumo elétrico industrial no ano de 2024, oferecendo uma visão clara da composição setorial atual em Minas Gerais.

Gráfico 9. Estrutura do consumo industrial de eletricidade (2024)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE, 2025.

A leitura do gráfico mostra que a metalurgia responde por aproximadamente 39,6% do consumo elétrico industrial do estado, consolidando-se como o principal segmento eletrointensivo. Em seguida aparece a mineração, com cerca de 19,3%, reforçando a interdependência entre as cadeias extrativa e metalúrgica. A categoria “demais setores” reúne um conjunto diversificado de atividades industriais e representa cerca de 14,6% do total.

No bloco intermediário, os produtos alimentícios respondem por cerca de 8,0% do consumo, enquanto produtos químicos e produtos de minerais não-metálicos concentram, respectivamente, 7,6% e 7,3%. Os segmentos de borracha e plástico e papel e celulose completam a estrutura com participações de 2,0% e 1,6%, mas possuem relevância estratégica em cadeias específicas, sobretudo associadas à agroindústria, embalagens e produção de insumos para outros setores.

Somados, metalurgia, mineração, química e minerais não-metálicos respondem por mais de 70% do consumo elétrico industrial em Minas Gerais, o que indica um núcleo de alta intensidade energética e orienta a priorização de ações de eficiência nesses ramos. Ao mesmo tempo, o peso crescente de alimentos, borracha e plásticos e papel e celulose reforça a importância de incorporar também esses setores intermediários em programas de eficiência energética voltados à modernização e à competitividade da indústria mineira.

Ao cruzar a fotografia de 2024 com a trajetória histórica da Tabela 3, observa-se que a participação de metalurgia e mineração vem se consolidando, enquanto setores intermediários, em especial alimentos, borracha e plásticos e papel e celulose, ganham espaço de forma gradual. Produtos de minerais não-metálicos apresentam leve perda relativa, ainda que permaneçam em patamar elevado, e a categoria “demais setores” encolhe ao longo do tempo. Esses movimentos indicam, ao mesmo tempo, concentração estrutural da demanda em cadeias intensivas em energia e diversificação progressiva da base industrial, com novas frentes para políticas de eficiência energética.

Box 1. Estrutura do consumo industrial de eletricidade (2024)

- **A indústria mineira é altamente eletrointensiva.**

Metalurgia, mineração, produtos químicos e minerais não-metálicos responderam por mais de 70% do consumo elétrico industrial em 2024.

- **Metalurgia e mineração lideram o crescimento.**

Ambos os setores ampliaram significativamente o uso de eletricidade ao longo da década, consolidando-se como os principais vetores da demanda industrial.

- **Setores intermediários estão ganhando espaço.**

Alimentos, borracha e plásticos e papel e celulose mostram crescimento constante, indicando dinamismo e novas frentes para ações de eficiência.

- **O consumo está cada vez mais concentrado.**

A participação da categoria “demais setores” diminui ao longo do tempo, reforçando o peso das cadeias intensivas em energia.

- **A estrutura atual combina concentração e diversificação gradual.**

Enquanto os grandes consumidores continuam dominantes, segmentos de médio porte ampliam sua relevância e devem ser considerados em políticas de eficiência energética.

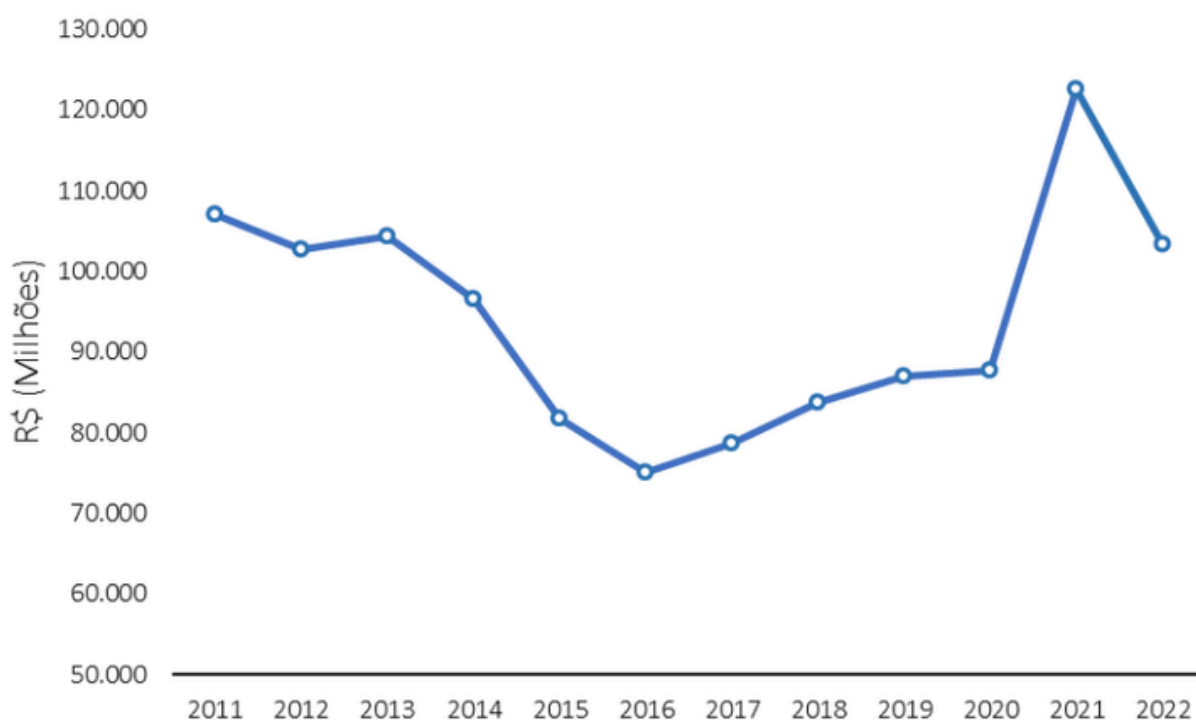
3.4 INTENSIDADE ELÉTRICA DO SETOR INDUSTRIAL

Uma das formas mais consolidadas de avaliar a eficiência energética de um setor econômico é por meio da intensidade energética (IE). Esse indicador expressa a razão entre o consumo total de energia associado a um determinado setor e o valor adicionado bruto gerado por ele. Em termos práticos, a IE mostra quanta energia é necessária para produzir uma unidade de valor econômico, permitindo identificar padrões de uso, comparar setores e monitorar ganhos (ou perdas) de eficiência ao longo do tempo.

Nesse sentido, o Gráfico 10 aborda a série histórica de evolução do valor adicionado bruto do intervalo de 2011 a 2022, revelando uma trajetória marcada por forte volatilidade ao longo do período analisado. Após iniciar 2011 em um patamar próximo de R\$ 107 bilhões, o setor apresentou relativa estabilidade até 2013.

A partir de 2014, contudo, observa-se uma queda acentuada, com o valor adicionado industrial recuando de forma contínua até atingir o ponto mínimo em 2016, reflexo direto da crise econômica nacional e de seus impactos prolongados sobre a atividade produtiva. Entre 2017 e 2020, verifica-se uma recuperação gradual, ainda que sem retornar aos níveis anteriores. Já em 2021, há um salto expressivo, chegando ao pico de mais de R\$122 bilhões. Em seguida, há uma queda em 2022, quando o valor adicionado chega a R\$ 103 bilhões.

Gráfico 10. PIB Estadual (valor adicionado a preços básicos) - indústria (preços de 2010)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do IPEADATA, 2025.

O Gráfico 11 apresenta uma comparação entre o consumo elétrico industrial, o valor adicionado da indústria e a intensidade elétrica do setor em Minas Gerais. Foram utilizadas séries anuais referentes ao período de 2011 a 2022. Todos os dados foram transformados para a base 100 no ano de 2011. A análise tem como ano base 2011 (2011 = 100), em virtude da disponibilidade de dados do consumo elétrico, os quais foram coletados da base de dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica da EPE.

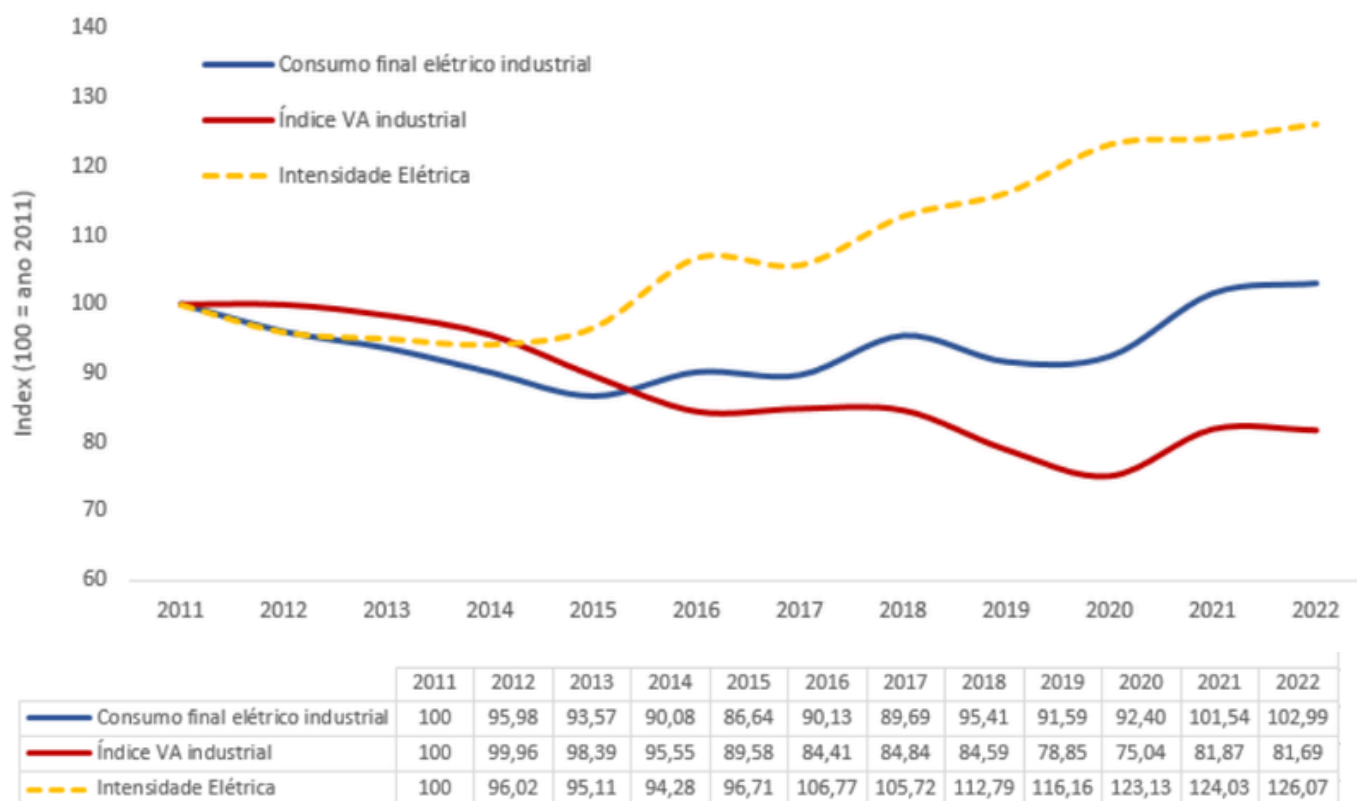
Para o cálculo da intensidade elétrica, foi utilizado como modelo a metodologia apresentada no Manual Metodológico do Atlas de Eficiência Energética - Brasil 2024 (EPE, 2024), sendo assim, calculado sob a ótica do Consumo Final Elétrico. A fórmula adotada segue abaixo:

$$I = \text{Consumo Final Elétrico (MW/h)} / \text{Valor Adicionado da Indústria (mil \$ [2010])}$$

Para a presente análise, considerou somente a perspectiva da eletricidade, não adentrando em outras fontes energéticas devido à disponibilidade de dados regionalizados.

Os dados utilizados foram: (i) Consumo Elétrico da Indústria, (ii) Valor Adicionado Bruto a preços correntes da indústria (o qual foi deflacionado para valores de 2010) e, (iii) Variação do Índice de Preço - Deflator implícito setorial do VAB (%). A fonte dos dados utilizados foram: a EPE para o consumo elétrico industrial; o IBGE para o valor adicionado bruto; e a Fundação João Pinheiro para o deflator setorial.

Gráfico 11. Consumo Elétrico e Valor Adicionado das Indústrias em Minas Gerais



Fonte: Elaboração própria, 2025.

O Gráfico 11 evidencia que, enquanto o consumo industrial de eletricidade apresenta relativa estabilidade, com leve recuperação após 2019, o VA industrial registra queda contínua até 2020, refletindo perda de dinamismo da atividade econômica. Essa combinação, consumo praticamente estável e VA em retração, resulta no aumento expressivo da intensidade elétrica, especialmente a partir de 2016, indicando maior quantidade de eletricidade consumida por unidade gerada.

Além disso, a trajetória da intensidade elétrica também reflete uma dinâmica estrutural importante: mesmo com avanços de eficiência e modernização tecnológica, a demanda por eletricidade continua crescendo, impulsionada pela digitalização, automação industrial e eletrificação de processos.

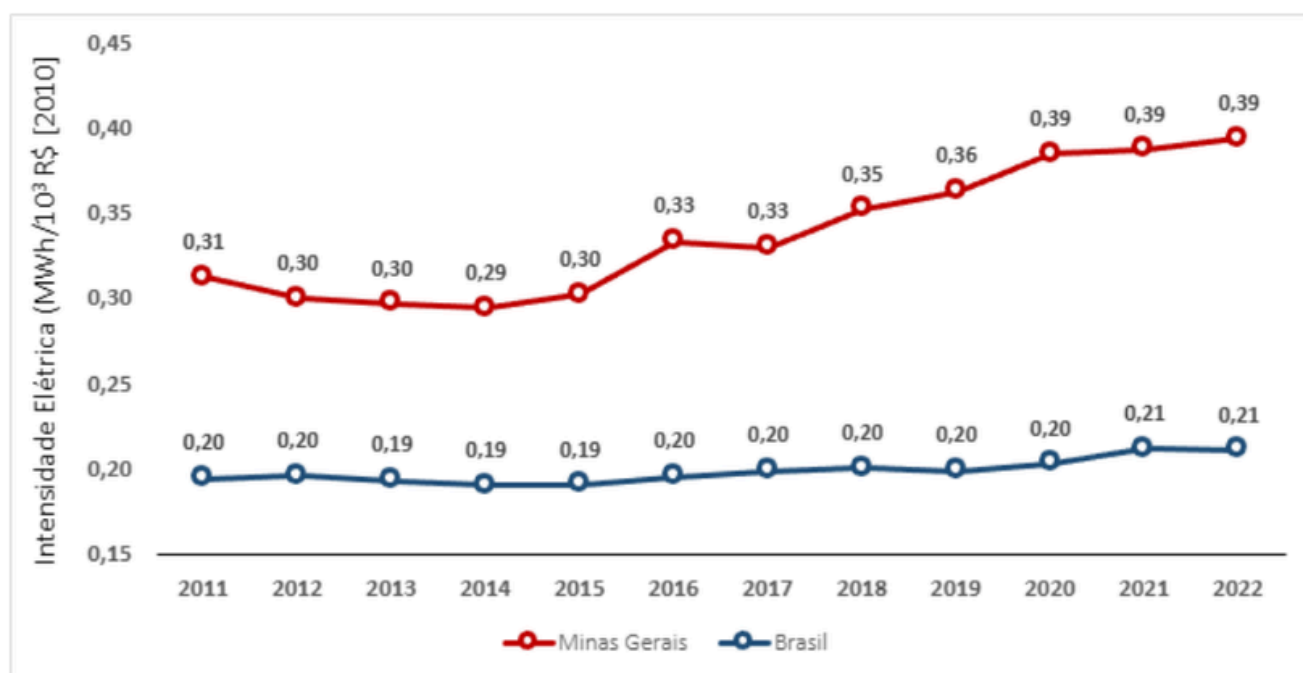
Assim, parte do aumento observado não decorre apenas de perdas de eficiência, mas do surgimento de novas cargas e novas formas de uso da energia, que elevam o consumo absoluto e pressionam a intensidade agregada. Isso significa que o indicador deve ser analisado considerando simultaneamente eficiência, evolução tecnológica e mudanças na composição do parque produtivo. Esse monitoramento contínuo é essencial para orientar políticas públicas capazes de acompanhar essa “corrida” entre eficiência e expansão das demandas energéticas.

Contudo, esse aumento na intensidade elétrica não pode ser associado automaticamente a retrocessos em eficiência, pois também reflete transformações na economia mineira, como o crescimento relativo de setores eletrointensivos ou a desaceleração de segmentos de maior valor agregado (EPE, 2024). Ademais, esse comportamento acompanha tendências nacionais e internacionais, onde os ganhos de eficiência industrial avançam em ritmo mais lento – cerca de 0,2% ao ano entre 2019 e 2023, segundo a IEA.

Dessa forma, a análise sugere que a intensificação do uso de eletricidade por unidade de produto está associada principalmente a fatores estruturais, e não somente a mudanças de eficiência, reforçando a importância de avaliar eficiência, atividade e estrutura produtiva de maneira integrada (EPE, 2024; IEA, 2025).

A mesma metodologia de cálculo da intensidade elétrica foi aplicada ao Brasil para fins comparativos, conforme ilustrado no Gráfico 12.

Gráfico 12. Evolução Intensidade Elétrica MG x Brasil (MWh/10³ R\$ [2010])



Fonte: Elaboração própria, 2025.

O Gráfico 12 evidencia que, embora ambas as curvas tenham apresentado um decréscimo inicial, seguido por um crescimento a partir de 2015, o comportamento de Minas Gerais diverge do Brasil. Enquanto a intensidade elétrica do Brasil permanece estável, variando apenas entre 0,19 e 0,21, a de Minas demonstra uma forte aceleração após 2015, passando de 0,30 para 0,39 em 2022. Essa disparidade resultou no aumento do hiato entre Minas e Brasil, indicando uma intensificação do uso de energia elétrica na economia mineira, em comparação com a tendência média do país, nos anos mais recentes. Parte desse comportamento reflete não apenas diferenças conjunturais, mas também o avanço de processos de modernização, digitalização e adoção de novas cargas elétricas na indústria mineira, que ampliam a demanda, mesmo em cenários de ganhos de eficiência.

A estrutura econômica de Minas Gerais é um fator determinante para a alta intensidade elétrica do estado, conforme mencionado. Minas Gerais é o segundo maior consumidor industrial de eletricidade do país, e o setor fabril possui uma participação no consumo elétrico estadual (54%) significativamente superior à média brasileira (36%). Consequentemente, um estado cuja base produtiva é fortemente ancorada em atividades industriais, muitas delas eletrointensivas, tende naturalmente a apresentar uma intensidade elétrica mais elevada do que regiões cuja economia é sustentada majoritariamente por setores menos dependentes de eletricidade. Esse contexto reforça a importância de monitorar continuamente a evolução tecnológica e setorial, uma vez que a combinação entre maior eletrificação dos processos produtivos e mudanças estruturais na composição industrial influencia diretamente a trajetória da intensidade elétrica ao longo do tempo.

04 Mapeamento Setoriais



MAPEAMENTO SETORIAIS

Este capítulo mapeia os principais segmentos industriais de Minas Gerais sob a ótica da eficiência energética e da transição justa. O Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) já indica que a indústria responde por cerca de um terço do consumo energético nacional e que existe um potencial técnico de redução de ~25% do consumo industrial por meio de medidas de eficiência. A referência à transição justa torna-se relevante porque a modernização tecnológica necessária para ampliar a eficiência implica atualização de processos, qualificação da força de trabalho e reconversão gradual de funções, garantindo que trabalhadores e empresas participem dos ganhos dessa transformação. As oportunidades incluem modernizar sistemas motrizes e automação, parcerias internacionais e o fortalecimento de programas como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) e o PROESCO. Este panorama introduz as bases para o mapeamento setorial a seguir.

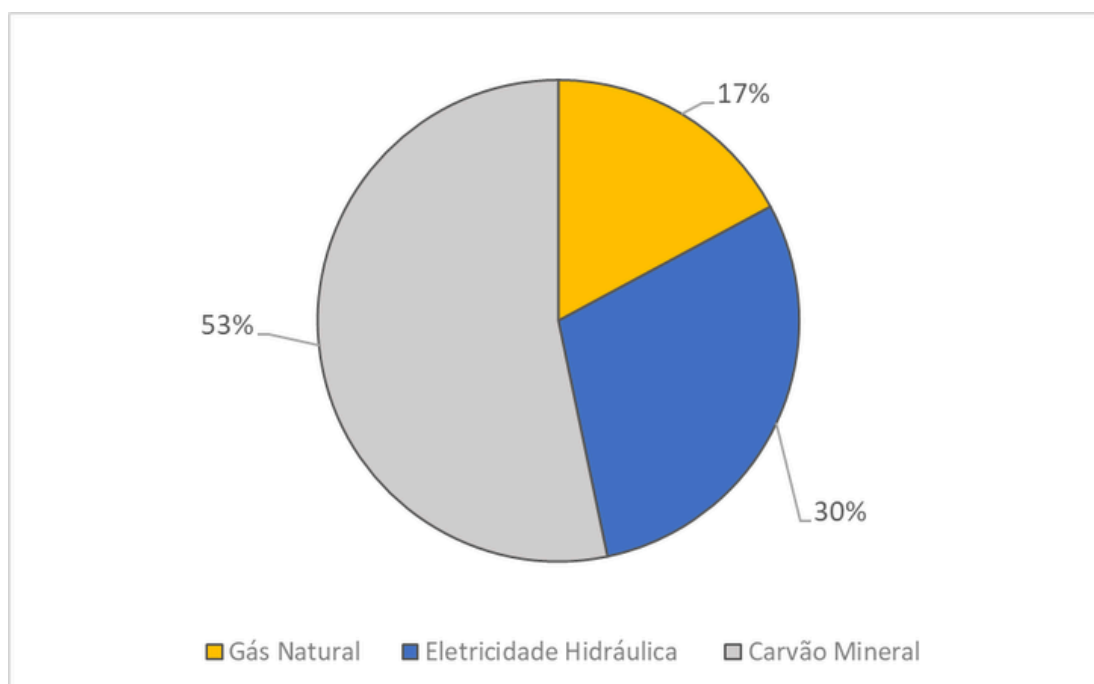
Estudos recentes mostram que mais de 80% do potencial técnico de economia de energia na indústria brasileira está nos processos térmicos utilizados em caldeiras, fornos e secadores. O programa PotencializEE, fruto da cooperação Brasil-Alemanha, dimensionou esse potencial e identificou ganhos relevantes por meio da recuperação de calor residual, eletrificação e substituição de combustíveis fósseis. Em Minas Gerais, onde predominam setores intensivos em calor – como metalurgia, cimento, química, alimentos e celulose – o foco em eficiência térmica torna-se especialmente estratégico. Ao mesmo tempo, o Programa de Eficiência Energética (PEE/ANEEL) e o Plano Nacional de Eficiência Energética evidenciam que a indústria participa pouco das iniciativas de eficiência, apesar de representar cerca de um terço do consumo elétrico nacional. Expandir esses mecanismos e articulá-los a instrumentos de financiamento é decisivo para converter o potencial identificado em ganhos concretos.

4.1. INDÚSTRIA DE METAIS

A indústria de metais em Minas Gerais possui importância estratégica e histórica para as economias estadual e nacional, articulando cadeias produtivas como siderurgia, fundição, ferroligas e metais não ferrosos. O setor responde por cerca de 19% do VBPI do estado, participa com aproximadamente 24% das exportações brasileiras de produtos metalúrgicos. Em 2024, a indústria reunia 471 empresas, mais de 68 mil empregos diretos e um VBPI superior a R\$ 134 bilhões (FIEMG, 2025; IBGE, 2024). Esse peso econômico se reflete não apenas na dimensão produtiva, mas também no papel da indústria minero-metalúrgica como estruturante para diversas regiões industriais de Minas Gerais.

A expressiva importância econômica do setor é acompanhada por uma elevada intensidade energética. Em 2022, a extração mineral, a metalurgia e a produção de minerais não metálicos consumiram, juntas, mais energia do que todas as residências do país, evidenciando a forte dependência energética da cadeia. De acordo com o Plano Estadual de Mineração de Minas Gerais (2025), a matriz permanece majoritariamente não renovável, com predominância do carvão mineral (31,5%; 124,9 TWh), seguido pela eletricidade hidráulica (19,7%; 78,1 TWh), carvão vegetal (17,5%; 69,4 TWh), derivados de petróleo (14,5%; 54,3 TWh) e gás natural (10,1%; 40,2 TWh), conforme demonstrado no Gráfico 13. Esse cenário reforça a necessidade de estratégias de eficiência energética, diversificação da matriz e adoção de tecnologias mais limpas para sustentar competitividade e reduzir emissões.

Gráfico 13. Composição da Geração de Energia Elétrica por Fonte na Indústria da Mineração (%)



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do Plano Estadual de Mineração de Minas Gerais, 2025.

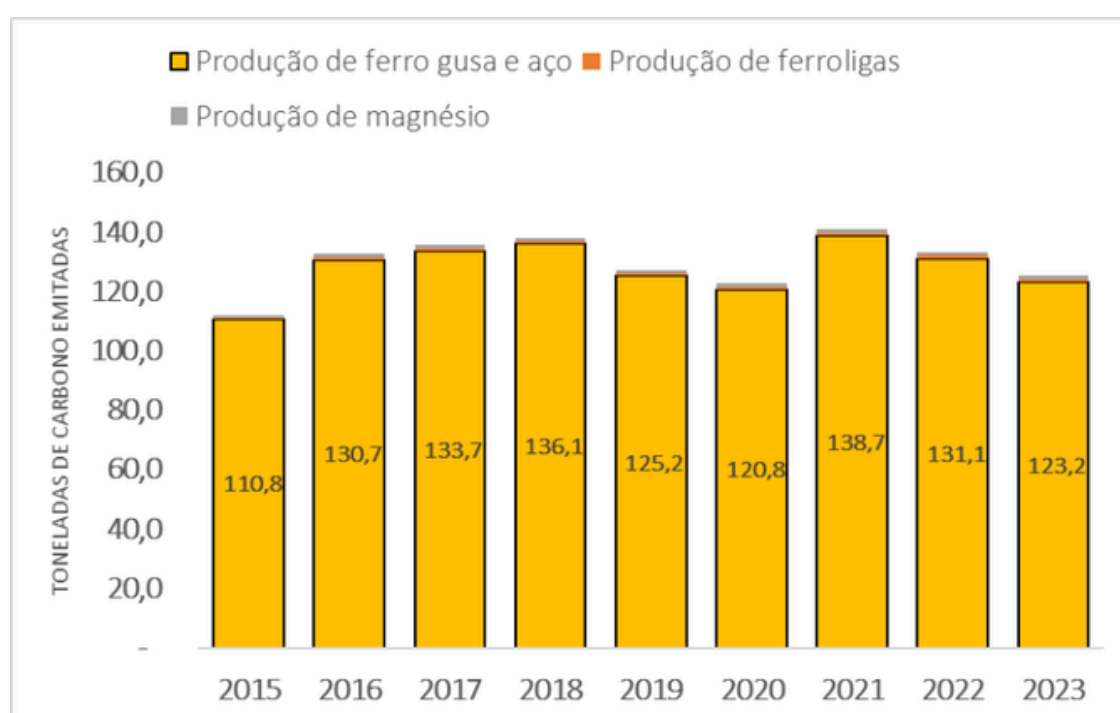
Em termos de inserção internacional, os segmentos de siderurgia, ferro-gusa e ferroligas concentraram US\$ 7,55 bilhões em exportações em 2024. A retomada do setor se reflete na estabilidade do comércio exterior, na recuperação dos níveis de emprego e no aumento de 16,8% da arrecadação de ICMS entre 2024 e 2025 (SEF-MG, 2025).

Contudo, essa liderança produtiva vem acompanhada de elevada intensidade de emissões: estima-se que a produção de metais em Minas Gerais gere cerca de 12,07 MtCO₂e por ano, sendo a produção de aço e ferro-gusa responsável por aproximadamente 94% das emissões do subsetor IPPU (Processos Industriais e Uso de Produtos), reflexo da forte concentração geológica e industrial da atividade no estado (Portal da Indústria, 2022).

Minas Gerais é o maior produtor de aço bruto do Brasil, responsável por 10,1 milhões de toneladas (29,7%) da produção nacional em 2022. A oferta de aço no país é concentrada em 12 empresas, com presença marcante no estado de grupos como ArcelorMittal, Gerdau, Usiminas, Vallourec e Aperam. Diferentemente do minério de ferro, voltado majoritariamente à exportação, a produção de aço bruto é fortemente orientada ao mercado interno. Ainda assim, a indústria siderúrgica nacional opera com capacidade ociosa desde 2007, devido ao descompasso entre expansão da capacidade instalada e a demanda doméstica.

A seguir, o Gráfico 14 apresenta a evolução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs), em toneladas de CO₂, associadas ao setor de metalurgia em Minas Gerais, com destaque para os subsegmentos de produção de ferro-gusa e aço, ferro-ligas e magnésio.

Gráfico 14. Evolução das Emissões de Gases do Efeito Estufa em toneladas de carbono (tCO₂) na indústria de metais – Minas Gerais



Fonte: Elaboração própria (SEEG, Observatório do Clima, 2024/v12.0).

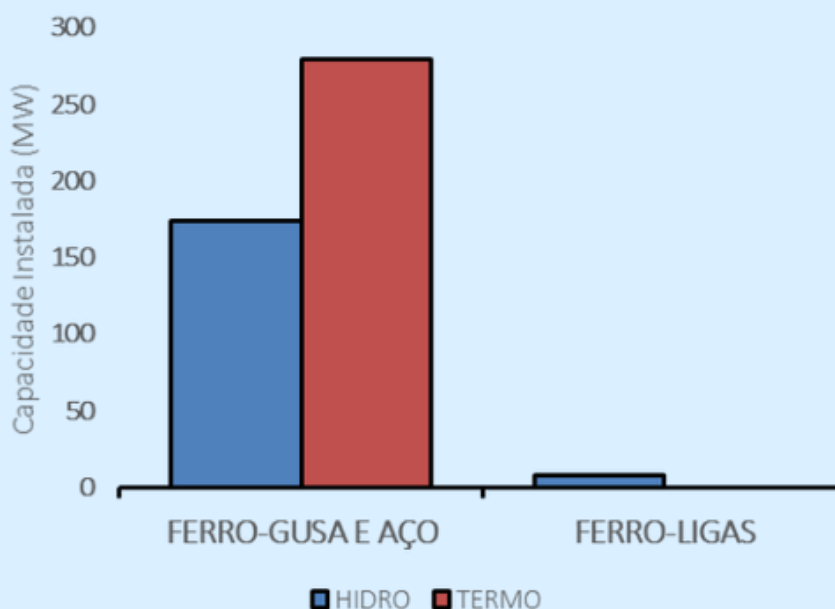
O gráfico evidencia que a produção de ferro-gusa e aço é o principal vetor de emissões do setor metalúrgico mineiro, refletindo sua posição central na estrutura industrial do estado. Observa-se um padrão de relativa estabilidade ao longo da série, com picos relevantes em 2018 e 2021 – anos associados a maior atividade produtiva e ao uso intensivo de rotas térmicas dependentes de carvão vegetal ou mineral.

Box 2. Autoprodução de energia - Indústria de Metais

A análise da autoprodução de energia evidencia diferenças significativas entre os setores de ferro-gusa e aço e ferro-ligas. No primeiro, a capacidade instalada apresenta maior participação da fonte térmica, que totaliza 279,1 MW, correspondendo à parcela predominante do suprimento próprio. A fonte hidráulica, embora relevante, representa 174 MW.

No segmento de ferro-ligas, por outro lado, a autoprodução é bastante limitada e concentrada exclusivamente na fonte hidráulica, com 7,8 MW, enquanto a geração térmica é inexistente. Esses resultados mostram que a estrutura de suprimento próprio difere substancialmente entre os dois setores, com maior diversificação energética no grupo de ferro-gusa e aço e predominância hidroelétrica no setor de ferro-ligas.

Gráfico 15. Capacidade Instalada em Autoprodutores na Indústria de Metais



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE, 2025.

Em 2023, verifica-se uma tendência de redução das emissões totais, acompanhada pela evolução do Valor Bruto da Produção Industrial (VBPI). Esse comportamento sugere uma combinação de fatores: ajustes operacionais, menor nível de atividade e possíveis ganhos de eficiência em processos térmicos, que são os principais responsáveis pelas emissões no setor.

Por fim, segundo o Plano de Energia e Mudanças Climáticas (2015), as maiores oportunidades de eficiência energética na siderurgia concentram-se no aquecimento direto via fornos, vapor de processo e força motriz. Na produção de ferro-ligas, os ganhos potenciais situam-se principalmente na etapa de fusão e no uso de fornos elétricos mais eficientes.

4.2 PRODUTOS MINERAIS

A indústria de minerais em Minas Gerais atua como um mecanismo de vanguarda da estrutura produtiva estadual, com forte integração aos setores de construção civil, metalurgia e agricultura. Nesse sentido, o estado é líder nacional na produção de calcário, cal e cimento, concentrando o maior número de minas em operação no país e abrigando parte relevante do parque cimenteiro brasileiro (SNIC, 2024). Essa atividade possui elevado peso econômico e energético, com processos intensivos em calor e responsáveis por parcela significativa das emissões do setor IPPU, especialmente na calcinação e na produção de clínquer.

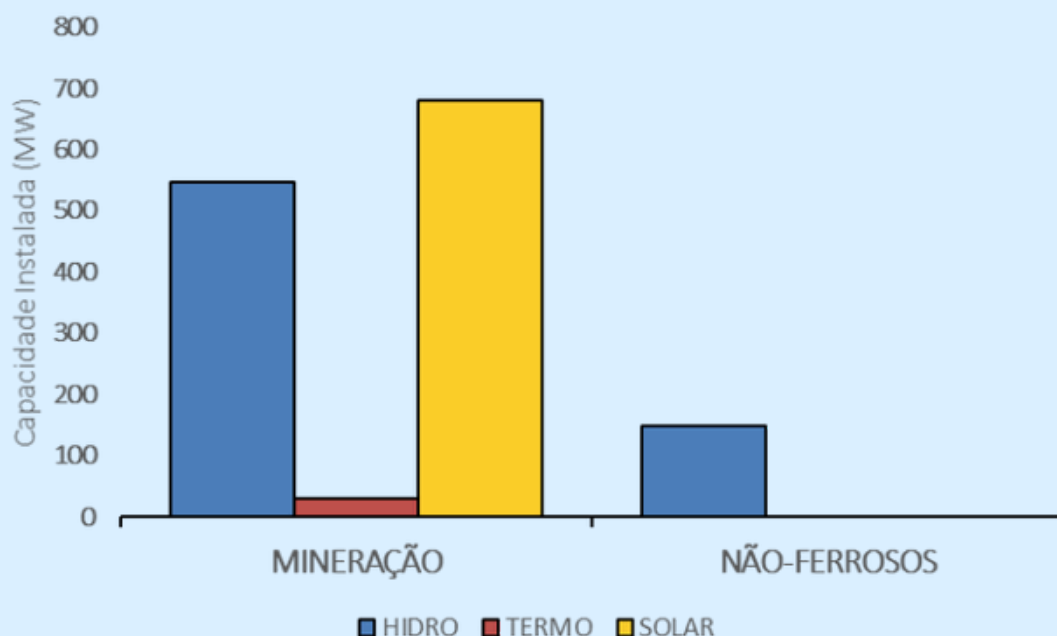
No contexto estadual, a indústria de minerais responde por quase metade das emissões industriais, com a produção de cal e cimento como principais atividades emissoras. Apesar desse perfil emissor, o setor apresenta avanços históricos de modernização tecnológica, uso de combustíveis alternativos, coprocessamento e melhorias contínuas em eficiência térmica, contribuindo para reduzir a intensidade de carbono e ampliar a competitividade.

Box 3. Autoprodução de Energia - Indústria de Minerais

No segmento de Mineração, observa-se forte predominância das fontes renováveis na autoprodução: a geração solar é a principal, totalizando 681,3 MW, seguida pela fonte hidráulica, com 546,9 MW. A geração térmica apresenta participação reduzida, com 30 MW.

No setor de Metais Não Ferrosos, a autoprodução é significativamente menor e concentrada exclusivamente na fonte hidráulica, que totaliza 148,1 MW. Não há registro de geração própria solar ou térmica.

Gráfico 16. Capacidade Instalada em Autoprodutores na Indústria de Minerais



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE, 2025.

Segundo o Plano de Energia e Mudanças Climáticas (2015), as principais oportunidades de eficiência energética no setor de mineração concentram-se na modernização de equipamentos – especialmente sistemas motrizes – e na melhoria do desempenho dos motores elétricos, incluindo práticas de manutenção, ajustes operacionais e substituição gradual de tecnologias obsoletas.

Dando continuidade ao panorama do setor de minerais, as próximas subseções detalham as características da indústria de cimento e de cal, segmentos essenciais para a mitigação de emissões e para a incorporação de tecnologias de baixo carbono, em consonância com as metas do PLAC-MG e com as políticas estaduais de transição energética.

4.2.1 Cimento

Minas Gerais é o principal polo cimenteiro do Brasil, ao produzir 20.037 mil toneladas em 2023 (30,1% da produção nacional) (SNIC, 2024). Isso reforça a relevância das escolhas de eficiência energética e descarbonização do estado. A centralidade do setor também gera sinergias com a siderurgia regional, dada a ampla disponibilidade de escória granulada de alto-forno no Quadrilátero Ferrífero, favorecendo o aumento de adições no cimento e a redução da intensidade de clínquer.

O setor de IPPU responde por cerca de 18% das emissões brutas de GEE de Minas Gerais, com média de 23 MtCO₂e/ano entre 2015 e 2019. Dentro desse grupo, a indústria mineral – especialmente cal e cimento – concentra aproximadamente 45% das emissões, com a fabricação de cimento alcançando 5,5 MtCO₂e em 2019. Essas emissões são inerentes à calcinação e ao uso de combustíveis térmicos.

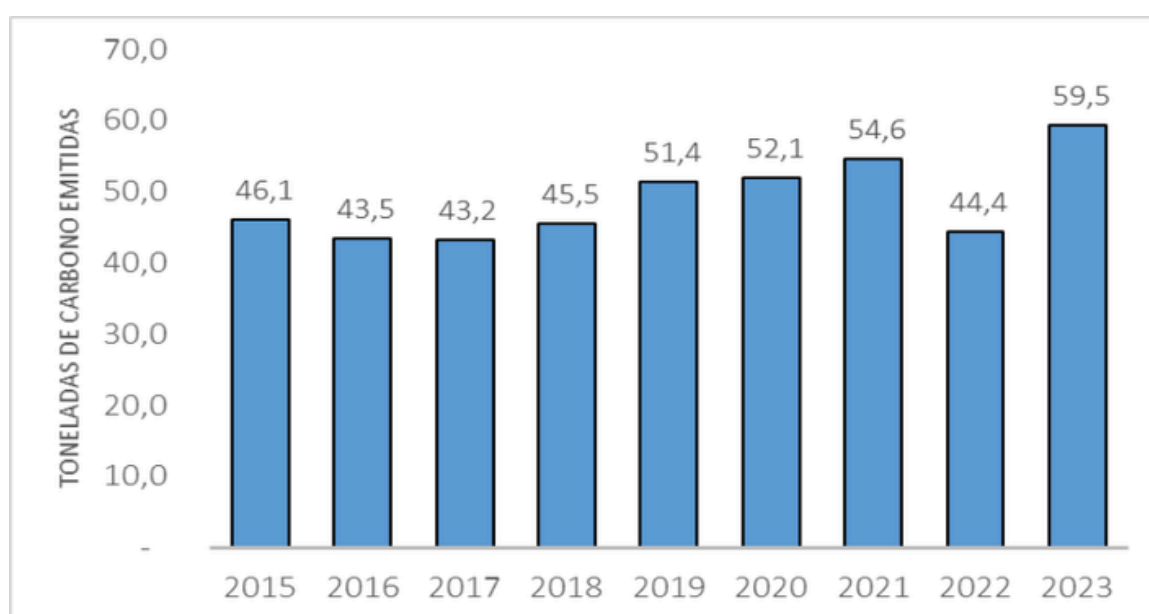
Assim, a indústria do cimento é altamente intensiva em energia térmica e elétrica e representa parcela relevante das emissões industriais, respondendo por 23,3% das emissões de processos industriais em 2023 (SEEG, 2024). O uso de combustíveis fósseis em processos térmicos intensifica emissões e reforça a necessidade de modernização de tecnologias (CNI, 2024), especialmente na substituição de fornos de via úmida.

Segundo o Plano de Energia e Mudanças Climáticas (2015), o maior potencial de conservação de energia térmica está na clínquerização, enquanto a conservação de energia elétrica concentra-se na preparação da matéria-prima. Tecnologias como pré-aquecedores de múltiplos estágios, pré-calcinadores, sistemas de combustão otimizados e resfriadores de clínquer permitem maior eficiência e redução de custos.

No consumo elétrico, a modernização é por vezes vista como onerosa, mas os custos tendem a ser compensados pela operação, sobretudo com a modernização da moagem – substituição de moinhos de bolas por moinhos verticais, separadores de alta eficiência – além de sistemas WHR, motores eficientes, inversores e controles digitais.

No Gráfico 17, apresenta-se a evolução das emissões de GEE da indústria do cimento entre 2015 e 2023, permitindo observar tendências recentes e a resposta do setor ao nível de atividade produtiva.

Gráfico 17. Evolução da Emissão de Gases do Efeito Estufa na Indústria do Cimento em Minas Gerais em (tCO₂e)



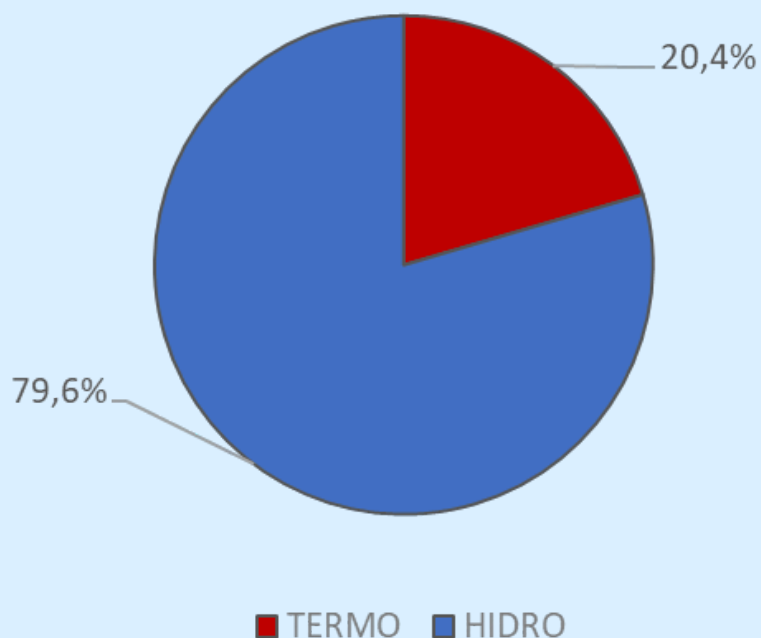
Fonte: Elaboração própria (SEEG, Observatório do Clima, 2024/v12.0).

A partir do Gráfico 17, observa-se o retorno do crescimento das emissões em 2023, indicando pressão adicional sobre a intensificação de estratégias de eficiência energética e transição térmica no setor. Esse movimento reforça a necessidade de fortalecer ações de mitigação no âmbito da agenda energética de Minas Gerais.

Box 4. Autoprodução de energia - Indústria de Cimento

A indústria de cimento conta com a participação de autoprodutores em sua matriz energética. Em 2024, o segmento registrou 18,1 MW de capacidade instalada em autoprodutores, dos quais 14,4 MW são provenientes de fonte hidráulica, correspondendo a aproximadamente 79,6% do total. A geração térmica representa 3,7 MW, o que equivale a cerca de 20,4% da capacidade instalada de autoprodução. Esses dados evidenciam a predominância da energia hídrica no suprimento próprio do setor, embora a fonte térmica ainda desempenhe papel complementar na operação.

Gráfico 18. Capacidade Instalada em Autoprodutores na Indústria de Cimento (%)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE, 2025.

4.2.2 Cal

A indústria da cal é um segmento estratégico na cadeia de minerais não metálicos de Minas Gerais, sustentado pela ampla disponibilidade de calcário no estado, especialmente nas regiões do São Francisco e de Divinópolis, que concentram 31% das reservas lavráveis (ALKMIM, 2018; ANM, 2021). Como insumo essencial, a cal virgem (CaO) é amplamente demandada por cadeias industriais fundamentais, destacando-se a siderurgia – onde atua como principal fundente na formação de escórias e remoção de impurezas – além de setores como construção civil, agricultura (correção de solos) e tratamento de água, reforçando sua relevância econômica e produtiva (PINTO, 2023; SOARES, 2007).

A produção de calcário e dolomito ocupa posição central na base mineral do estado: em 2022, respondeu por 24,7% do valor total da produção de minerais não metálicos (R\$ 1,9 bilhão), e em 2021 atingiu 42,5 milhões de toneladas beneficiadas, correspondentes a 14,3% da produção mineral beneficiada de Minas Gerais (ANM, 2023; SEDE, 2022).

O processo de produção de cal virgem é altamente intensivo em energia térmica, pois a calcinação do carbonato de cálcio exige temperaturas elevadas em fornos rotativos e gera emissões diretas de CO₂ tanto pela decomposição química quanto pela queima de combustíveis (SOARES, 2007; PINTO, 2023). Inserida no subsetor de minerais não metálicos, a indústria da cal integra um dos segmentos mais intensivos em energia da matriz produtiva brasileira. Em 2022, a produção de minerais não metálicos consumiu 95,1 TWh de energia – volume expressivo e suprido majoritariamente por fontes fósseis, como carvão mineral (31,5%), derivados de petróleo (14,5%) e gás natural (10,1%), além de eletricidade cuja oferta nacional é predominantemente hidráulica (19,7%)(EPE, 2023).

Nesse contexto, a indústria da cal desempenha papel decisivo para a competitividade produtiva de Minas Gerais, articulando-se a cadeias econômicas como siderurgia, construção civil, agropecuária e saneamento. O setor demanda elevado consumo de energia elétrica e térmica ao longo de etapas como britagem, calcinação e moagem, operações determinantes para a qualidade final do produto. Esse perfil reforça a necessidade de modernização tecnológica e de ganhos de eficiência energética, sobretudo em um estado que reúne importantes reservas calcárias e abriga polos siderúrgicos relevantes. Assim, a indústria da cal consolida-se como elo estrutural da economia mineira, contribuindo para geração de valor, emprego e integração produtiva regional (SEDE, 2022; ANM, 2023).

4.3 INDÚSTRIA QUÍMICA

A indústria química de Minas Gerais apresenta uma estrutura produtiva diversificada e consolidada, abrangendo desde produtos farmacêuticos, perfumaria e higiene pessoal até defensivos agrícolas, resinas e outros químicos orgânicos. Em 2023, o setor reuniu 957 empresas e mais de 30 mil empregos diretos, alcançando um Valor Bruto da Produção Industrial (VBPI) de R\$ 43,8 bilhões e um Valor da Transformação Industrial (VTI) de R\$ 12,3 bilhões (FIEMG, 2025; IBGE, 2024).

Essa amplitude produtiva se articula de forma estratégica com cadeias essenciais da economia mineira, como mineração, metalurgia, fertilizantes e transformação, reforçando o papel central da química como fornecedora de insumos intermediários e produtos de alto valor agregado. Entre esses segmentos, destaca-se a cadeia de fertilizantes, intensiva em energia térmica e elétrica, e sustentada pela disponibilidade regional de minerais como fosfato e calcário, o que posiciona o estado como território favorável à expansão da indústria química vinculada ao setor mineral.

Apesar de ser relativamente menos emissora de GEE quando comparada a outros subsetores industriais, a indústria química enfrenta desafios relevantes de competitividade, sustentabilidade energética e dependência de insumos importados. Essas condições reforçam a necessidade de inovação tecnológica, aumento da eficiência no uso de energia e transição para processos produtivos mais limpos, especialmente diante do avanço da nova economia industrial verde.

Além disso, o caráter transversal do setor, que provê insumos críticos ao agronegócio, construção civil, saneamento, papel e celulose, metalurgia e diversas atividades industriais, evidencia sua importância estratégica para o desenvolvimento produtivo de Minas Gerais.

No Gráfico 19, apresenta-se a evolução das emissões de GEE associadas aos processos industriais químicos em Minas Gerais, destacando-se a produção de amônia, que caracteriza o perfil emissor do setor.

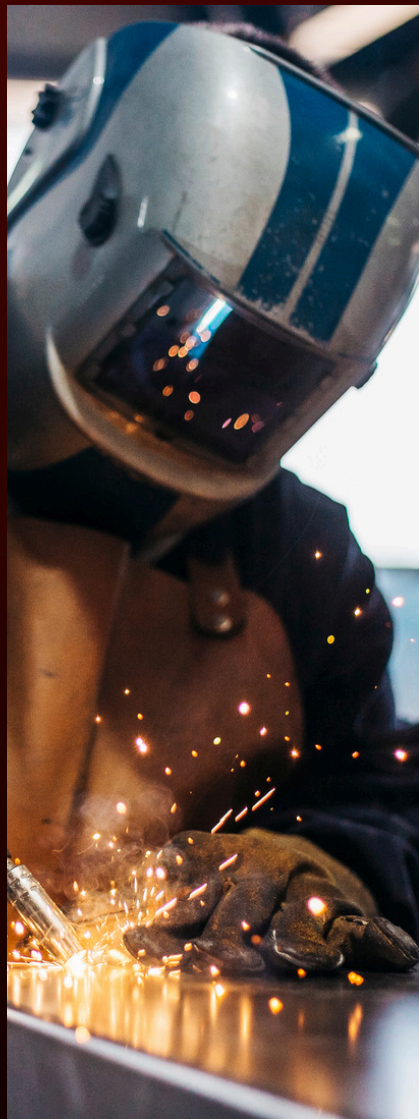
Gráfico 19. Evolução da Emissão de Gases do Efeito Estufa na Indústria da Química em Minas Gerais em (tCO₂e)



Fonte: Elaboração própria (SEEG, Observatório do Clima, 2024/v12.0).

O gráfico evidencia que o setor químico mantém um padrão relativamente constante e baixo de emissões ao longo do período analisado (2017–2023), refletindo seu menor peso relativo nas emissões industriais de Minas Gerais. Essa estabilidade reforça a importância de priorizar ações de eficiência energética, inovação tecnológica e redução de dependência externa de insumos, em vez de estratégias focadas apenas em mitigação direta de emissões.

Ademais, o consumo de energia da indústria química é um dos grandes fatores positivos deste setor, uma vez que é o último tipo de indústria em Minas Gerais no ranking de consumo energético (E+, 2025), enquanto apresenta alta geração de empregos, elevado valor bruto da produção industrial (VBPI) e significativo valor de transformação industrial. Nesse sentido, dos 5,5 milhões de MW/h consumidos pela indústria mineira, apenas 15 mil MW/h é consumido pela indústria química, demonstrando como um exemplo, mesmo que envolva uma soma de estruturas produtivas.



05 Mapeamento de Políticas e Iniciativas Existentes

MAPEAMENTO DE POLÍTICAS E INICIATIVAS EXISTENTES

A agenda de eficiência energética na indústria mineira não se constrói do zero, ela se apoia em um conjunto de políticas nacionais, programas regulados, linhas de financiamento e referências técnicas que já oferecem uma base concreta para a modernização do parque industrial. Este capítulo apresenta, de forma integrada, os principais instrumentos disponíveis no Brasil e em Minas Gerais, bem como estudos e referências que ajudam a traduzir metas de eficiência energética em ações práticas. A intenção é fornecer um repertório útil para empresas, associações setoriais e gestores públicos que desejam estruturar projetos de eficiência alinhados à transição energética e às metas climáticas do estado.

5.1 POLÍTICAS E INICIATIVAS EXISTENTES NO BRASIL E EM MINAS GERAIS

No plano federal, um dos pilares da política de uso racional da energia elétrica é o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), coordenado pelo Ministério de Minas e Energia em parceria com a Eletrobras. O programa atua em diferentes frentes, desde a certificação e rotulagem de equipamentos elétricos mais eficientes até a qualificação de edificações e o apoio a ações setoriais. No âmbito industrial, o PROCEL Indústria disponibiliza guias, metodologias e estudos que apoiam a gestão de energia, a modernização de sistemas motrizes e a identificação de oportunidades de economia de energia em processos produtivos mais complexos (BRASIL, 2024).

A dimensão estratégica da eficiência energética para a indústria brasileira está expressa no Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf), que estima um potencial técnico de redução em torno de 25% no consumo de energia do setor industrial a partir de medidas de modernização térmica e elétrica. Esse plano ressalta a importância de atacar tantos usos finais elétricos (motores, sistemas de bombeamento, ventilação e refrigeração) quanto processos térmicos intensivos em calor, que ainda respondem por parcela significativa do consumo energético e das emissões de GEE. Na mesma direção, estudos recentes desenvolvidos no âmbito da cooperação Brasil-Alemanha apontam que mais de 80% do potencial de economia térmica na indústria está concentrado em caldeiras, fornos e secadores, reforçando a centralidade da eficiência em processos de geração e aproveitamento de calor.

Em Minas Gerais, essas diretrizes nacionais dialogam com um conjunto de instrumentos estaduais que colocam a eficiência energética industrial como eixo estruturante da política climática e de desenvolvimento. O PLAC-MG estabelece metas específicas para o setor industrial, incluindo a ampliação da eficiência energética, o fomento à cogeração com fontes não fósseis, o aproveitamento de energia residual e a modernização tecnológica de processos eletrointensivos.

Entre os indicadores de acompanhamento, destacam-se a economia de energia elétrica acumulada por projetos de eficiência da CEMIG e os desembolsos do Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais (BDMG) em linhas de crédito verdes destinadas à indústria, ambos indicadores estão dispostos nas seções 5.2 e 5.3 respectivamente.

Por fim, o conjunto de bases estatísticas e estudos nacionais utilizado ao longo deste documento (como o Atlas da Eficiência Energética Brasil 2024, o Balanço Energético Nacional 2025, os inventários de emissões do SEEG e as análises setoriais de entidades empresariais) fornece a sustentação técnica necessária para que essas políticas sejam acompanhadas por indicadores robustos de consumo, intensidade energética e emissões.

Além das políticas e instrumentos de financiamento, a indústria mineira pode se apoiar em referências técnicas que ajudam a transformar a agenda de eficiência energética em decisões concretas. O Caderno de Ações Norteadoras para o Avanço da Eficiência Energética no Brasil reúne conceitos, indicadores e propostas de ação para os setores de indústria, edificações e transportes, organizando medidas prioritárias de gestão de energia, modernização de sistemas motrizes e substituição de tecnologias obsoletas, bem como a atual governança e as ações de estímulo já realizadas em nível nacional (EPE; MME, 2024).

Na mesma direção, o “Roadmap: Os Caminhos do Setor Empresarial Brasileiro na Transição Energética Nacional”, elaborado pelo Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS) em parceria com a PSR, apresenta um conjunto de soluções de descarbonização para diferentes segmentos, conciliando redução de emissões com oportunidades de negócios. O estudo destaca, entre outros pontos, rotas de maior eficiência em processos térmicos, alternativas de combustíveis de menor intensidade de carbono, captura e uso de calor residual e eletrificação de etapas produtivas em setores como aço, cimento e indústria química, cadeias nas quais Minas Gerais possui presença significativa (CEBDS; PSR, 2023).

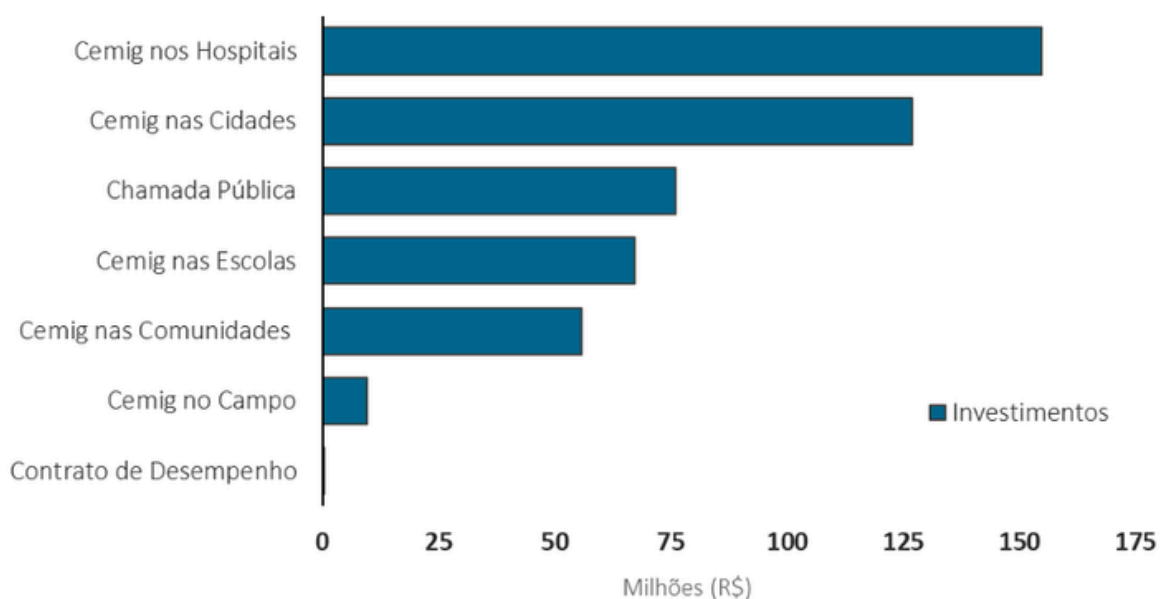
As experiências de retrofit e modernização de edificações industriais discutidas neste estudo completam esse conjunto de referências ao mostrar o potencial de intervenções em envoltória, iluminação, ventilação e climatização para reduzir o consumo de energia elétrica e melhorar o conforto nos ambientes de trabalho. Em muitos casos, trata-se de medidas de retorno relativamente rápido, que podem ser articuladas com linhas de crédito verde e programas regulados de eficiência energética, constituindo um portfólio inicial de ações para a indústria mineira.

5.2 PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA CEMIG

Outro instrumento estruturante é o Programa de Eficiência Energética (PEE), regulado pela ANEEL e operacionalizado pelas distribuidoras de energia. Em Minas Gerais, o PEE é executado pela CEMIG e se consolidou como um canal importante de apoio a projetos de eficiência em consumidores de diferentes perfis. Em especial, o PEE canaliza recursos para modernização de instalações elétricas e redução de perdas em diferentes tipos de consumidores, incluindo o setor industrial, por meio de subprogramas voltados à modernização de instalações, substituição de motores, automação de sistemas e melhoria de iluminação.

O Gráfico 20 apresenta a distribuição dos investimentos do PEE por subprograma no período recente, evidenciando os segmentos que mais concentraram recursos aplicados pela CEMIG.

Gráfico 20. Investimento por Subprograma do PEE

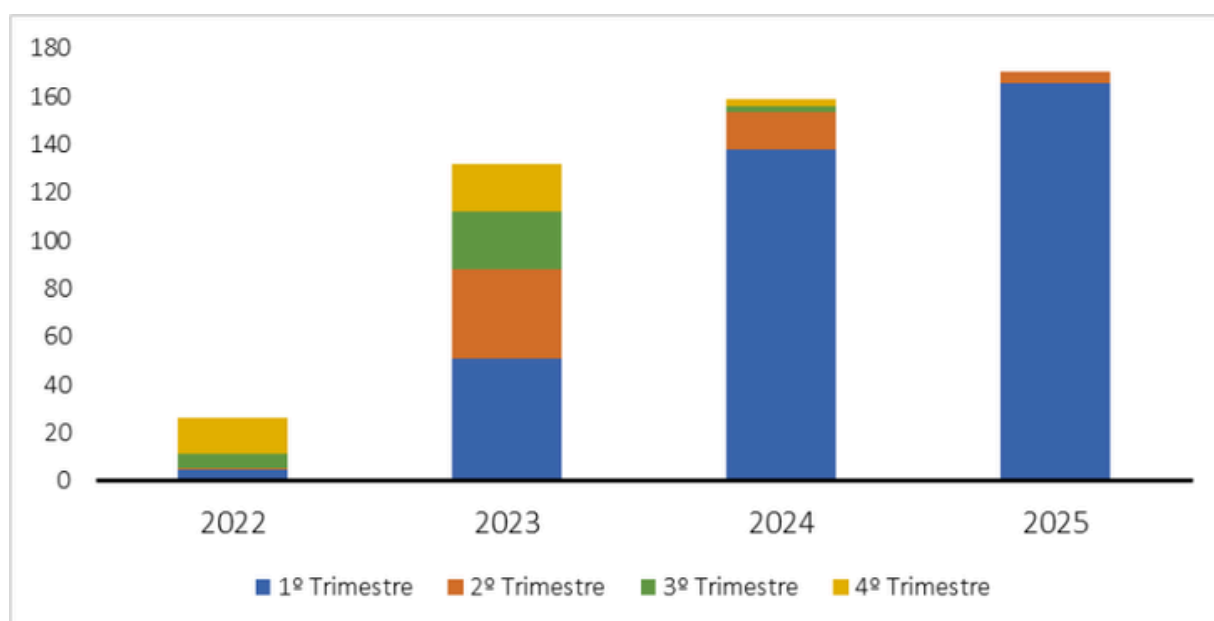


Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da CEMIG, 2025.

A partir do gráfico, observa-se que os subprogramas “Cemig nos Hospitais” e “Cemig nas Cidades” concentram a maior parte dos recursos, refletindo o foco em serviços essenciais e infraestrutura urbana. As Chamadas Públicas também assumem papel relevante, ao canalizar investimentos diretamente para consumidores, inclusive industriais, com potencial de modernização de processos, sistemas motrizes e instalações elétricas. Os demais subprogramas, como “Cemig nas Escolas”, “Cemig nas Comunidades”, “Cemig no Campo” e contratos de desempenho, complementam a estratégia ao difundir tecnologias eficientes em diferentes segmentos da base consumidora.

Entre 2019 e 2025, o programa já despendeu R\$ 490,72 milhões ao todo e alcançou cerca de 18,5 milhões de beneficiados. O Gráfico 21 ilustra a economia de energia proporcionada pelos projetos de eficiência realizados no período.

Gráfico 21. Economia de energia proporcionada pelos projetos de eficiência realizados viabilizados pela Cemig (GWh)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do MRV Climático, 2025.

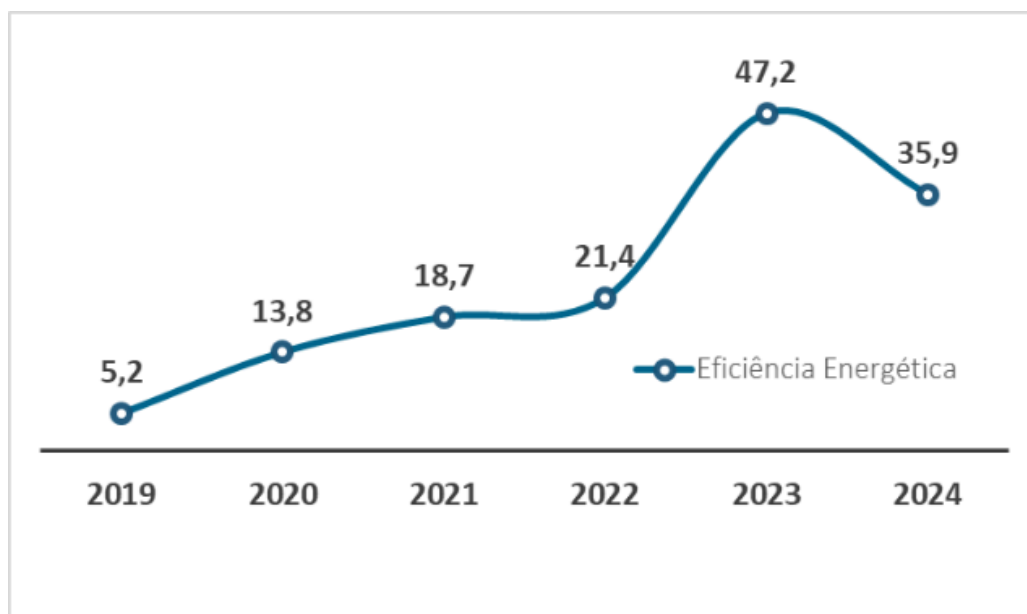
Os dados revelam uma forte concentração das atividades no primeiro trimestre ao longo da série, com crescimento expressivo entre 2022 (26,4 GWh) e 2025 (170,2 GWh), especialmente no salto observado em 2024 e mantido em 2025. A tendência do aumento deste indicador está diretamente ligada à relevância que a pauta vem tomando em Minas. Esse comportamento sugere que, além do montante de recursos investidos, a seleção de projetos, o perfil dos consumidores atendidos e o tipo de intervenção realizada influenciam diretamente o desempenho energético final. Para o setor industrial, esses números reforçam o potencial do PEE como instrumento para viabilizar tecnicamente e financeiramente ações de eficiência, especialmente quando articulado às metas do PLAC-MG para a indústria.

5.3 BANCO DE DESENVOLVIMENTO DE MINAS GERAIS – BDMG

O Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais (BDMG) integra o sistema de desenvolvimento econômico do estado, sendo vinculado à Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico (SEDE). Diante da missão de promover o desenvolvimento sustentável de Minas Gerais, o banco possui cinco compromissos que balizam as suas ações, sendo eles: (i) inclusão financeira; (ii) energia limpa; (iii) investimentos prioritários com impacto positivo; (iv) cidades mineiras inclusivas e sustentáveis; e (v) agricultura de baixo carbono.

Nesse contexto, no âmbito do tema tratado neste documento, o banco visa fomentar investimentos destinados à expansão das fontes de energia renovável e ao aumento da eficiência energética. O Gráfico 22 a seguir apresenta a evolução dos desembolsos destinados exclusivamente a projetos de eficiência energética no período de 2019 a 2024.

Gráfico 22. Evolução desembolsos com eficiência energética pelo BDMG (R\$ milhões)



Fonte: Elaboração própria a partir de dados dos Relatórios de Sustentabilidade do BDMG (2019–2024).

Observa-se uma trajetória de crescimento contínuo até 2023, ano em que se registrou o pico, com valores superiores a R\$ 47 milhões, seguido por uma redução em 2024. Ao longo dos seis anos, foi desembolsado um montante de mais de R\$ 142 milhões para apoiar iniciativas de modernização de sistemas de iluminação pública, eficiência térmica em edificações e substituição de equipamentos de alto consumo. Esses dados evidenciam que o BDMG vem incorporando, de forma crescente, a eficiência energética como eixo de sua política de crédito, alinhada às diretrizes climáticas e energéticas de Minas Gerais.

Em 2024, foi destinado um montante de R\$ 35,9 milhões para a modernização do sistema de iluminação pública em 45 municípios mineiros, com foco na instalação de iluminação ou equipamentos mais eficientes. A Tabela 4 sintetiza a distribuição desses recursos entre as principais subcategorias de investimento.

Tabela 4. Desembolso em eficiência energética pelo BDMG em 2024 em R\$ milhões

Eficiência energética	R\$35,90
Sistema de iluminação pública - melhoria da eficiência	R\$20,60
Sistema de iluminação pública - expansão da rede com tecnologia mais eficiente	R\$9,20
Eficiência energética de equipamentos por meio de técnicas que reduzam o consumo de energia	R\$4,10
Atualização de edifícios construção que permitam redução no consumo de energia	R\$2,00

Fonte: BDMG, 2025.

A Tabela 4 mostra que a maioria dos recursos foi direcionada à melhoria da eficiência da iluminação pública (R\$ 20,6 milhões) e à expansão da rede com tecnologia mais eficiente (R\$ 9,2 milhões), indicando uma priorização de ações com impacto direto e mensurável na redução do consumo de energia em infraestrutura urbana. Valores menores, mas ainda relevantes, foram aplicados na eficiência de equipamentos (R\$ 4,1 milhões) e na atualização de edificações (R\$ 2,0 milhões), demonstrando espaço para ampliar a participação de projetos industriais e de edificações privadas nas futuras carteiras de crédito para eficiência energética.

Ainda em 2024, a carteira de crédito totalizou R\$ 852,9 milhões em operações voltadas à energia renovável e R\$ 100,2 milhões destinados à eficiência energética, principalmente em projetos de energia solar fotovoltaica e de modernização de sistemas elétricos em empresas e prefeituras.

O banco possui duas linhas de crédito principais que abarcam projetos de eficiência energética, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Linhas de crédito BDMG

Linha	Objetivo	Condições	Itens Financiáveis
BDMG Verde	Financiamento de projetos para eficiência e economia da empresa. Promoção da transição para uma economia verde.	- PJ com faturamento bruto anual a partir de R\$16MM. - Prazo de até 144 meses e 24 meses de carência. - Taxas a partir de 1,90% a.a + Selic.	- Aquecimento solar; - Edifícios eficientes; - Equipamentos eficientes; - Instalações industriais eficientes.
FINAME Fundo Clima	Aquisição de máquinas e equipamentos relacionados à redução de emissões de GEE e à adaptação às mudanças do clima e aos seus efeitos.	- Empresas com faturamento anual a partir de R\$16MM. - Prazo de até 144 meses e 24 meses de carência. - Taxas especiais.	- Máquinas e equipamentos cadastrados no PBE ou com selo Procel; - Equipamentos de eficiência energética¹.

Fonte: BDMG, 2025.

A tabela 5 mostra que a linha BDMG Verde é orientada ao financiamento de projetos voltados à eficiência e economia de energia nas empresas, com prazos de até 144 meses e possibilidade de carência, contemplando itens como aquecimento solar, edifícios eficientes, equipamentos eficientes e instalações industriais otimizadas. Já o FINAME Fundo Clima é voltado à aquisição de máquinas e equipamentos relacionados à redução de emissões de GEE e à adaptação às mudanças do clima, incluindo tecnologias cadastradas no PBE ou com Selo Procel e equipamentos de eficiência energética.

Em conjunto, essas linhas configuram um conjunto de instrumentos financeiros que podem ser mobilizados pela indústria mineira para viabilizar projetos de retrofit, automação e modernização de processos produtivos. Assim, é possível criar um ambiente mais favorável para que empresas mineiras superem barreiras de investimento e atualizem gradualmente seu parque produtivo.

06 Oportunidades de Eficiência Energética na Indústria Mineira



OPORTUNIDADES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA MINEIRA

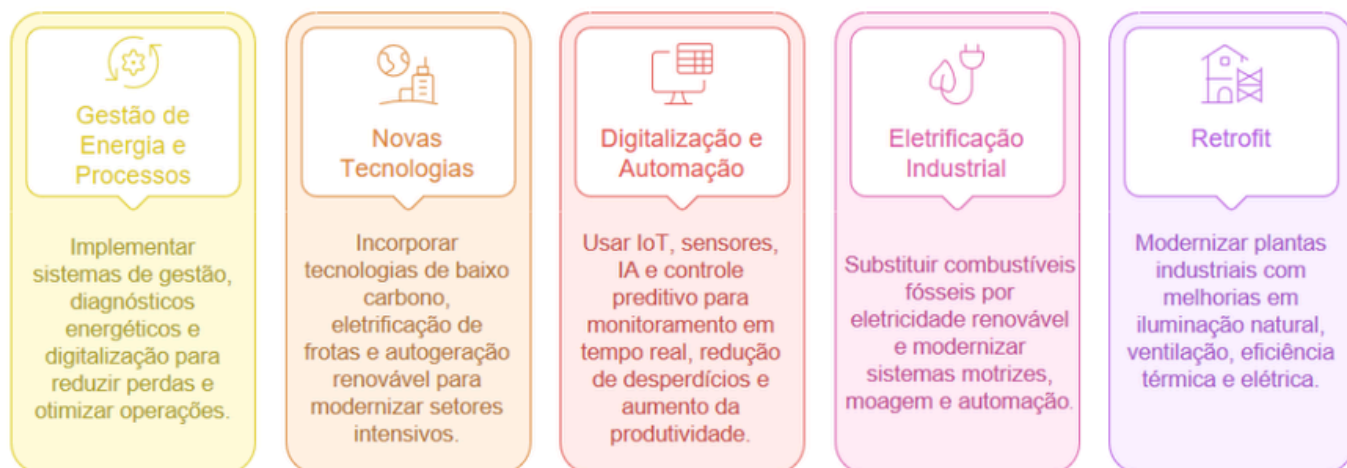
As oportunidades de eficiência energética na indústria mineira tornam-se mais evidentes a partir das análises de emissões de GEE e da intensidade elétrica calculada, conforme discutido nos tópicos 3 e 4. Nesse contexto, destacam-se os setores de Minerais Metálicos, Minerais Não Metálicos (Cimento e Cal), Siderurgia e Indústria Química, nos quais a busca por eficiência é estratégica para reduzir custos e ampliar a competitividade industrial. Minas Gerais, por exemplo, consolidou em 2024 uma posição de destaque na indústria do cimento, um segmento particularmente relevante para a economia estadual.

Esses setores figuram entre os maiores consumidores de energia do país: em 2024, a indústria respondeu por 52% do consumo energético estadual, com a metalurgia e a produção de minerais entre as atividades mais intensivas. Diante desse cenário, a ampliação da eficiência energética representa não apenas uma agenda ambiental, mas também um vetor de produtividade, segurança energética e inovação industrial.

Nesse contexto, abrem-se amplas oportunidades para Minas Gerais avançar na gestão otimizada de energia, adotar tecnologias de baixo carbono, digitalizar sistemas produtivos, eletrificar etapas industriais e modernizar plantas por meio de retrofits energéticos. Esses ganhos são especialmente relevantes em setores intensivos: na siderurgia, com rotas de baixo carbono; na produção de cimento e cal, ainda dependente de combustíveis fósseis; e na indústria química, que desponta como candidata natural à eletrificação e ao uso de insumos limpos, como o biometano.

A Figura 1 apresenta um conjunto de eixos que sintetizam essas oportunidades de eficiência energética para a indústria mineira, destacando caminhos práticos e estratégicos alinhados ao PLAC-MG e às tendências internacionais. Esses eixos orientam a transição para uma economia industrial mais resiliente, competitiva e de baixo carbono, e são aprofundados nas seções seguintes.

Figura 1. Oportunidades de Eficiência Energética para o Setor Industrial



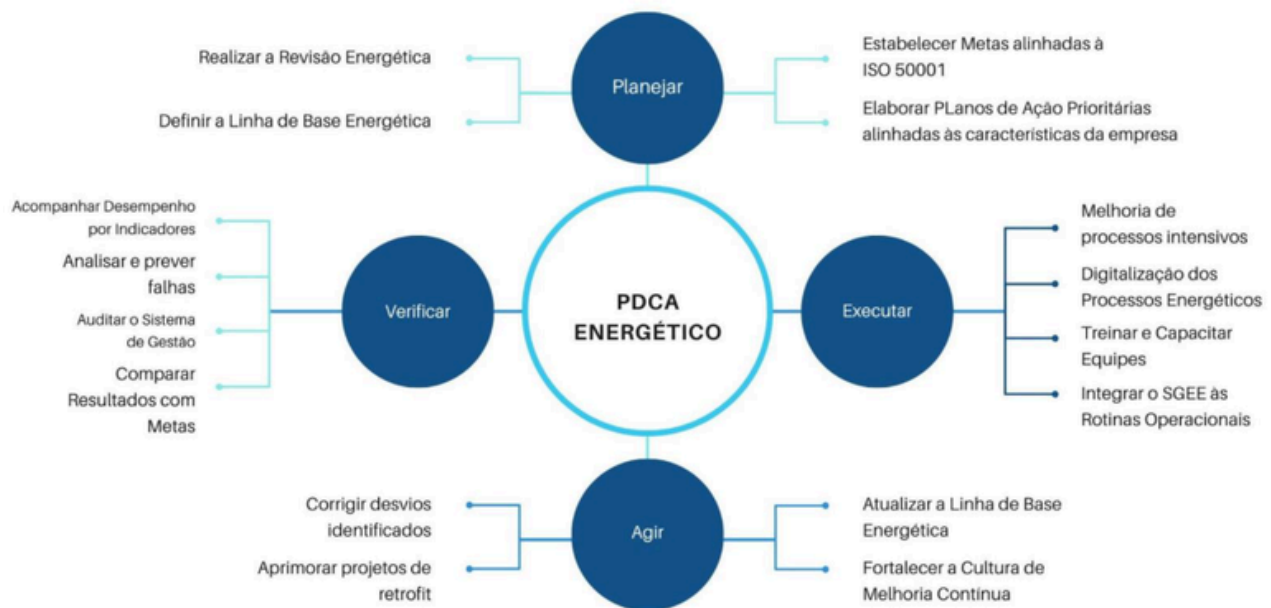
Fonte: Elaboração própria, 2025.

6.1 GESTÃO DE ENERGIA E GESTÃO DE PROCESSOS

A gestão de energia e de processo acaba por constituir um setor estratégico para ampliar a eficiência energética na indústria mineira, especialmente nos setores abordados nesse documento. Em um estado cuja base produtiva depende fortemente de insumos térmicos e elétricos, a eficiência energética representa o primeiro e mais custo-efetivo passo para reduzir emissões, otimizar recursos e elevar a competitividade industrial. A adoção de métodos estruturados de gestão permite identificar desperdícios, priorizar intervenções e promover uma cultura de melhoria contínua, condição essencial para que Minas Gerais avance na transição para uma economia industrial de baixo carbono.

Em primeiro lugar, a implementação de um Sistema de Gestão de Eficiência Energética (SGEE), alinhado às diretrizes da ISO 50001, é recomendada para todas as indústrias de médio e grande porte do estado. O sistema organiza o controle de consumo, estabelece metas, cria rotinas e institucionaliza a melhoria contínua com base no ciclo PDCA, conforme apresentado na Figura 2 a seguir.

Figura 2. PDCA do Sistema de Gestão de Eficiência Energética



Fonte: Elaboração própria, 2025.

A revisão energética e a definição da Linha de Base Energética (LBE) permitem mapear consumos por etapa produtiva, identificar processos críticos e orientar ações de redução de perdas, retrofit e automação. Ferramentas de diagnóstico energético, aplicadas de forma matricial, priorizam intervenções em processos intensivos – como fornos, moinhos, compressores, sinterização e calcinação – contribuindo diretamente para a redução de custos e emissões em setores historicamente eletrointensivos. Em Minas Gerais, onde fatores geológicos e operacionais influenciam a performance industrial, essa abordagem estruturada é fundamental para garantir competitividade e estabilidade operacional (DE SOUSA MEGDA, 2023).

A digitalização amplia ainda mais o potencial de gestão eficiente da energia. O monitoramento em tempo real, por meio de micromedidores, sensores IoT, sistemas SCADA e plataformas em nuvem, fornece dados precisos sobre consumo térmico e elétrico, permitindo ajustes imediatos em fornos, reatores, altos-fornos e equipamentos de moagem. Tecnologias da Indústria 4.0 – como gêmeos digitais, machine learning e analytics – transformam a gestão energética em um processo proativo, capaz de prever falhas, reduzir variabilidade e otimizar cargas e rotas térmicas (DE SOUSA MEGDA, 2023).

Associadas a programas de capacitação e ao fortalecimento da cultura interna de eficiência, essas ferramentas consolidam uma gestão energética robusta, integrando sustentabilidade, redução de emissões e alta performance operacional, em linha com as exigências da transição energética e da nova economia de baixo carbono.

6.2 ADOÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS

Para elevar o nível de eficiência energética e acelerar a descarbonização industrial, tem-se a adoção de novas tecnologias. No cenário de Minas Gerais, há a dimensão de dois grandes grupos: Tecnologias de Descarbonização de Processo, que alteram rotas produtivas por meio da substituição de combustíveis e matérias-primas, e Tecnologias Habilitadoras e de Digitalização, que otimizam energia, automatizam sistemas e integram inteligência de dados às operações industriais. Como é visto na Figura 3, que sintetiza o mecanismo de adoção de novas tecnologias.

Figura 3. Mecanismo de Adoção de Novas Tecnologias



Fonte: Elaboração própria, 2025.

No setor de minerais metálicos, que inclui siderurgia e mineração, a inovação se revela essencial para atender à agenda ESG e ampliar a competitividade global do aço mineiro. Avanços como a rota de Redução Direta a Hidrogênio (DRI-H₂) despontam como alternativas capazes de eliminar emissões diretas ao substituir o coque por hidrogênio verde, enquanto materiais inovadores, como o Briquete Verde de Minério de Ferro, reduzem o consumo energético e as emissões de partículas ao dispensar processos de aglomeração intensivos. Outras rotas disruptivas, como a Eletrólise de Óxidos Fundidos (MOE), e tecnologias de mitigação como Captura, Uso e Armazenamento de Carbono (CCUS), ampliam o portfólio de soluções de baixo carbono (DE SOUSA MEGDA, 2023; SEDE, 2025).

Na mineração, existe a possibilidade de eletrificação de frotas, de uso de correias transportadoras (truckless) e de sistemas trolley, os quais reduzem emissões operacionais, enquanto projetos de autogeração solar e eólica fortalecem a segurança energética de grandes mineradoras. A incorporação de recuperação de calor e energia em processos metalúrgicos complementa o conjunto de soluções, reduzindo desperdícios e reforçando a sustentabilidade das operações (SEDE, 2025).

Na indústria do cimento, as novas tecnologias representam o principal caminho para mitigar os impactos climáticos, especialmente diante do desafio estrutural associado à decomposição térmica do calcário. A ampliação de rotas de CCUS torna-se central para alcançar a neutralidade até 2050, complementada pela substituição de combustíveis fósseis por alternativas com alta fração de biomassa e, no futuro, por hidrogênio de baixo carbono ou eletrificação parcial dos fornos (DE SOUSA MEGDA, 2023).

A eficiência térmica dos fornos passa a depender de tecnologias modernas de controle do balanço de calor, com ajustes precisos nas variáveis operacionais para reduzir o consumo específico de energia. A eficiência elétrica também é fortalecida por melhorias nos sistemas de moagem, como a moagem separada, e pelo uso crescente de materiais cimentícios suplementares, reduzindo o teor de clínquer no produto final (DE SOUSA MEGDA, 2023).

No setor químico, por sua vez, a transição tecnológica se pauta pela eletrificação total dos processos energointensivos, viabilizada pela matriz elétrica relativamente limpa do Brasil, associada ao uso de hidrogênio de baixo carbono e de biometano como insumos térmicos e químicos. A expansão da química verde, sustentada por programas de PD&I, impulsiona o desenvolvimento de materiais avançados e tecnologias estratégicas, como grafeno e terras raras, essenciais para cadeias de energia limpa como baterias e ímãs permanentes.

6.3 DIGITALIZAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS

Transversalmente a todas essas oportunidades, as tecnologias habilitadoras de digitalização ampliam substancialmente a eficiência energética industrial ao permitir monitoramento em tempo real e tomada de decisão baseada em dados. Soluções de Mineração 4.0, integrando IA, machine learning, IoT e analytics, aprimoram a eficiência de processos e reduzem perdas energéticas e hídricas. A instalação de micromedidores inteligentes e o armazenamento em nuvem permitem registrar milhões de medições por minuto, garantindo rastreabilidade completa do consumo energético nas plantas industriais (SEBRAE, 2022).

Modelos de Controle Preditivo Avançado (PCA), como foi citado, tem mecanismos de redes neurais aplicadas ao controle de fornos de cal, antecipam variações operacionais e realizam ajustes automáticos, reduzindo em até 2% o consumo de energia e mais de 11% os picos súbitos de potência (GUZZO, 2024). A automação industrial, associada à substituição de equipamentos obsoletos por motores e transformadores de alto rendimento, fecha o ciclo tecnológico, gerando ganhos de produtividade, redução de desperdícios e melhorias na performance energética. Embora todas essas tecnologias exijam investimentos elevados e dependam de ambiente regulatório e incentivos adequados, representam o caminho estruturante para a competitividade e sustentabilidade da indústria mineira no contexto da transição energética (GUZZO, 2024).

Finalmente, destaca-se a aplicação crescente de plataformas integradas de rastreabilidade e ESG, que unem consumo energético, emissões de CO₂, uso de água, resíduos e indicadores operacionais em uma única arquitetura digital. Grandes empresas em MG (como Vale, Anglo American, CSN, Gerdau, Votorantim e InterCement) são exemplos dessa migração para a digitalização de parte do processo produtivo, que com relatórios de emissões são gerados automaticamente a partir dos próprios sistemas industriais, diminuindo erros e padronizando o monitoramento ambiental exigido por investidores e mercados internacionais (SEDE, 2025).

6.4 ELETRIFICAÇÃO INDUSTRIAL

Ainda nas possibilidades de aproveitamento tecnológico, tem-se a eletrificação industrial que constitui uma das estratégias mais relevantes para elevar a eficiência energética e acelerar a descarbonização nos setores de cimento, minerais metálicos e indústria química em Minas Gerais. Inserida em um ambiente nacional marcado por uma matriz majoritariamente renovável, essa transição se apresenta como um diferencial competitivo estruturante, capaz de impulsionar Minas Gerais para a vanguarda da indústria verde. A eletrificação opera em dois eixos centrais: a substituição de combustíveis fósseis em processos termicamente intensivos e a otimização do consumo elétrico já existente, como em sistemas motrizes, moagem e automação industrial (GUZZO, 2024).

No setor de minerais metálicos, especialmente siderurgia, mineração e produção de alumínio, a eletrificação desempenha papel determinante na redução de emissões e custos. A siderurgia caminha para tecnologias como os Fornos Elétricos a Arco (EAF), que, combinados com sucata metálica ou ferro-esponja, oferecem rotas de produção de aço de baixo carbono. Por fim, tecnologias disruptivas, como a Eletrólise de Óxidos Fundidos (MOE), eliminam emissões diretas ao substituir completamente o coque por eletricidade (GUZZO, 2024).

Na mineração, a eletrificação de frotas avança com sistemas como o trolley e operações truckless, enquanto já temos exemplos concretos de atuação: as empresas Vale e Anglo American expandem a autogeração solar e eólica para garantir suprimento renovável, reduzir custos e cumprir metas de eficiência energética que chegam a 30% até 2030 (SEDE, 2025).

Na indústria química, os processos eletrointensivos, principalmente a amônia e cloro-soda, tornam a eletrificação um vetor natural de eficiência, sobretudo em Minas Gerais, onde há forte integração com cadeias de fertilizantes e minerais industriais. A migração para eletricidade renovável e o uso crescente de hidrogênio verde consolidam o estado como ambiente promissor para química verde, especialmente em atividades de grande impacto energético e emissões (DE SOUSA MEGDA, 2023).

Já na indústria do cimento, embora o principal desafio esteja relacionado às emissões térmicas e de processo, a eletrificação contribui para a modernização da moagem, o uso de tecnologias mais eficientes e a progressiva eletrificação de fornos entre 2030 e 2050. O setor também se beneficia da recuperação de calor residual, capaz de reduzir o consumo elétrico em até 30% (SEDE, 2025).

De forma comum a todos os setores industriais mineiros, a eficiência elétrica é reforçada por ações estruturais, como a modernização de sistemas motrizes, responsáveis por dois terços do consumo energético industrial, com motores de alto rendimento, inversores de frequência e correção do fator de potência.

A digitalização e automação ampliam esse potencial ao permitir monitoramento em tempo real por micromedidores, uso de inteligência artificial para identificar desperdícios e otimização dos fluxos energéticos. Medidas adicionais, como a substituição por iluminação LED e a modernização de sistemas de ar comprimido, completam o conjunto de ações que posiciona a eletrificação como eixo estratégico para a competitividade e sustentabilidade da indústria de Minas Gerais (DE SOUSA MEGDA, 2023).

6.5 RETROFIT COM FOCO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Quando analisamos a aplicação da eficiência energética, a modernização do parque, da planta e do edifício industrial mineiro envolve não apenas a redução de custos operacionais, mas também a sustentabilidade ambiental e o fortalecimento da competitividade das empresas.

O retrofit é o conjunto de intervenções que modernizam edificações, equipamentos e sistemas existentes, sem a necessidade de substituição radical, possibilitando um processo de modernização gradual. Apresenta-se, assim, como uma estratégia prioritária para a atualização tecnológica e energética das indústrias (MYRTAJ, 2025).

A diversidade climática de Minas Gerais e o elevado potencial de radiação solar ampliam a atratividade de soluções passivas e complementares de eficiência energética que podem integrar intervenções de retrofit, especialmente em regiões com maior incidência solar. Essas condições permitem reduzir a demanda por iluminação artificial e, em alguns casos, por climatização, complementando os ganhos proporcionados pelo retrofit industrial.

Combinada à forte presença de setores intensivos em energia, a aplicação de retrofit para fins de eficiência energética pode gerar resultados expressivos tanto econômicos quanto ambientais. Uma das intervenções mais eficazes para melhorar o desempenho energético de fábricas e galpões é o retrofit de coberturas industriais, que inclui a substituição parcial de coberturas por materiais translúcidos, instalação de claraboias e uso de painéis prismáticos de alto desempenho. Essas soluções ampliam a iluminação natural e reduzem significativamente o consumo de energia elétrica. De acordo com Myrtaj (2025), a integração de superfícies translúcidas com controle de radiação e isolamento térmico adequado pode reduzir em até 40% a energia destinada à iluminação.

No caso mineiro, conforme o Atlas Solarimétrico (CEMIG, 2016), o estado possui uma média solar anual de 1.354 kWh/kWp de Energia Específica e 0,79 de Rendimento Global Médio (PR), indicando elevada incidência solar na maior parte do ano. Essa condição favorece a adoção de superfícies translúcidas e soluções passivas de iluminação, reduzindo a necessidade de luminárias artificiais e ampliando o conforto ambiental.

A ventilação natural também constitui um pilar importante do retrofit para eficiência energética. A implementação de aberturas estratégicas, lanternins, sheds e venezianas melhora a circulação de ar e reduz a carga térmica interna, minimizando a necessidade de ventilação mecânica ou ar-condicionado (MYRTAJ, 2025). Em regiões de clima mais ameno, como o Sul de Minas e Campo das Vertentes, sistemas híbridos de ventilação natural e mecânica podem garantir conforto térmico e qualidade do ar, promovendo ambientes de trabalho mais saudáveis e produtivos. Essas medidas reduzem o consumo energético e diminuem a fadiga térmica em instalações industriais.

A redução dos custos operacionais é um benefício direto do retrofit energético. A incorporação de soluções passivas de iluminação e ventilação natural gera economia significativa de energia elétrica e reduz a necessidade de manutenção de sistemas artificiais. Os impactos do retrofit industrial estendem-se além da economia de energia, abrangendo ganhos ambientais, sociais e produtivos. Conforme destacam Stock e Seliger (2016), essas práticas promovem a reutilização, a remanufatura e a reciclagem de componentes, reduzindo resíduos e consumo de matérias-primas, em consonância com os princípios da economia circular e com as diretrizes da política ambiental mineira.

Ao diminuir o uso de energia proveniente de fontes fósseis, o retrofit contribui para a descarbonização e para o cumprimento das metas do PLAC-MG, ao mesmo tempo em que melhora o conforto térmico, a iluminação e a qualidade do ar nas instalações industriais. Além de fortalecer a imagem de responsabilidade socioambiental das empresas, essa modernização amplia o acesso a linhas de crédito verde e incentivos à eficiência energética, consolidando o retrofit como um instrumento estratégico que integra inovação tecnológica, sustentabilidade e competitividade industrial em Minas Gerais.

Em síntese, as oportunidades de eficiência energética configuram um eixo estratégico para impulsionar a competitividade, reduzir emissões e preparar o parque produtivo estadual para uma economia de baixo carbono. A articulação entre gestão energética, digitalização, eletrificação, adoção de novas tecnologias e retrofit demonstra que Minas Gerais possui capacidade concreta de transformar seus setores mais intensivos, siderurgia, cimento, cal e química, em referências nacionais de inovação e sustentabilidade. Ao integrar essas frentes ao PLAC-MG e às tendências internacionais de descarbonização, o estado consolida um posicionamento industrial alinhado às demandas globais por eficiência, rastreabilidade e desempenho ambiental.

Assim, o conjunto de estratégias discutidas fortalece a produtividade, reduz custos operacionais, amplia a resiliência energética e atrai investimentos, reforçando o papel de Minas Gerais como protagonista da transição energética brasileira. Com base nesse panorama, os eixos apresentados a seguir oferecem caminhos práticos para orientar empresas, gestores públicos e formuladores de políticas na construção de um ambiente industrial mais competitivo, moderno e sustentável.



07 Conclusão

CONCLUSÃO

A análise desenvolvida ao longo deste estudo evidencia que a eficiência energética é um dos pilares para sustentar a competitividade industrial de Minas Gerais em um contexto de transição energética acelerada e corrida tecnológica global. O diagnóstico do consumo de energia elétrica, realizado a partir de bases secundárias oficiais, revelou um estado com forte presença de setores eletrointensivos, em especial metalurgia, mineração, cimento, cal e química, segmentos que concentram parcela significativa da demanda industrial e moldam a intensidade elétrica da economia mineira.

Essas evidências demonstram que a eficiência energética não deve ser tratada apenas como uma medida de redução de custos, mas como um elemento estruturante para mitigar riscos, reduzir emissões associadas ao uso de energia e ampliar a resiliência produtiva. Ao organizar dados dispersos, identificar padrões de consumo e mapear oportunidades de modernização, o estudo é um insumo técnico relevante para orientar o planejamento público e privado. Nessa perspectiva, reafirma-se o papel do Governo de Minas Gerais como articulador e facilitador, aproximando indústria, instituições financeiras, entidades setoriais, universidades e centros de pesquisa e garantindo acesso transparente a informações qualificadas para apoiar decisões estratégicas.

Além disso, ao reunir políticas, programas e instrumentos de financiamento disponíveis, o estudo contribui para que gestores e empresas compreendam de forma integrada o ambiente de apoio existente, ampliando a capacidade de implementar ações de eficiência energética com maior clareza e previsibilidade. Essa transparência é fundamental para que o setor produtivo enxergue a eficiência não como um custo adicional, mas como uma oportunidade concreta de inovação, competitividade e alinhamento às tendências globais da nova economia industrial.

O estudo também dialoga diretamente com as metas do Plano Estadual de Ação Climática – PLAC-MG, especialmente no eixo de eficiência energética, ao indicar caminhos práticos para aprimorar a gestão de energia, promover retrofits, digitalizar processos e incentivar tecnologias de baixo carbono. Em um cenário marcado por avanços tecnológicos rápidos e desafios climáticos crescentes, tais ações precisam ser dinâmicas, revisadas periodicamente e orientadas por dados atualizados, mantendo Minas Gerais bem posicionada e atenta às oportunidades da transição energética.

Como próximos passos, recomenda-se avançar para uma fase de coleta de dados primários junto às indústrias mineiras, ampliando a compreensão sobre o uso de outras fontes energéticas relevantes – como combustíveis fósseis, biomassa e energia térmica – e capturando oportunidades de eficiência que não são visíveis em bases secundárias. Esse aprofundamento permitirá a construção de políticas ainda mais precisas e alinhadas à realidade operacional das empresas, fortalecendo o papel do estado como agente técnico e articulador.

Assim, o estudo não se encerra em si mesmo: ele inaugura uma agenda contínua de cooperação entre Estado e setor produtivo. A atualização regular das informações, o monitoramento de indicadores energéticos e o desenvolvimento conjunto de soluções e projetos-piloto podem transformar este trabalho em uma plataforma viva de políticas e ações. Dessa forma, Minas Gerais reforça sua capacidade de planejar, antecipar tendências e apoiar uma transição energética justa, competitiva e socialmente inclusiva, alinhada às exigências tecnológicas e climáticas que moldam o futuro da indústria.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Avaliação de impactos econômicos, ambientais e sociais advindos das melhorias propostas no PEE/ANEEL para o desenvolvimento de projetos de eficiência energética industrial. Brasília: ANEEL, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Manual dos Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE. Resolução Normativa ANEEL nº 920, de 23 de fevereiro de 2021. Brasília, 2021.

ALVES, Carlos Alexandre da Silva; PORTELLA, Leandro Luis. Transição da indústria siderúrgica para economia verde: desafios e oportunidades.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. *Roadmap Tecnológico do Setor de Cimento no Brasil*. São Paulo: ABCP/SNIC, 2019.

BDMG [Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais]. Relatório de Sustentabilidade 2024. BDMG, 2025. Disponível em: <https://bdmg.mg.gov.br/relatorio-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 18 nov. 2025.

BDMG [Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais]. Sustentabilidade – Crédito Verde. Disponível em: <https://www.bdmg.mg.gov.br/credito-verde/>. Acesso em: 18 nov. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Novas políticas públicas para eficiência energética industrial podem gerar economia de R\$ 10 bi e a redução de cerca de 4,5 MtCO₂e até 2050. Brasília, 2023a.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Nacional de Energia 2030 – Volume 11: Eficiência Energética. Brasília: MME; EPE, 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL. Brasília, 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME); Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Potencial de empregos gerados na área de eficiência energética no Brasil de 2018 até 2030. Brasília: MME; GIZ, 2019. Elaborado por: Mitsidi Projetos; International Energy Initiative – IEI Brasil. Projeto: Sistemas de Energia do Futuro.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT – GIZ. PotencializEE – Programa Investimentos Transformadores de Eficiência Energética na Indústria: o programa. Brasília, 2023b.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; ARAÚJO, Elizio Damião Gonçalves de. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. 2015.

CENERGIA; PPE; COPPE/UFRJ. Plano de Descarbonização para o Estado de Minas Gerais: dentro de um Brasil clima neutro em 2050. Rio de Janeiro: PPE/COPPE/UFRJ, 2022.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (CEBDS); PSR – Energy Consulting and Analytics. Roadmap: os caminhos do setor empresarial brasileiro na transição energética nacional. Rio de Janeiro: CEBDS, 2023. Disponível em: <https://cebds.org/publicacoes/roadmap-os-caminhos-do-setor-empresarial-brasileiro-na-transicao-energetica-nacional/>. Acesso em: 18 nov. 2025.

CNI – Confederação Nacional da Indústria. *Descarbonização da indústria: análise de experiências internacionais e recomendações para o Brasil*. Brasília: CNI, 2024. 114 p. ISBN 9788579572722.

DE SOUSA MEGDA, Humberto et al. Sistema de gestão de eficiência energética aplicado à siderurgia. *Revista Brasileira de Mecatrônica*, v. 6, n. 1, p. 28-47, 2023.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Atlas da Eficiência Energética Brasil | 2024: Relatório de Indicadores. EPE, 2024.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Balanço Energético Nacional 2025: Ano base 2024. EPE, 2025.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Caderno de ações norteadoras para o avanço da eficiência energética no Brasil. Rio de Janeiro: EPE, 2024.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. *Inova-e: panorama dos investimentos de inovação em energia no Brasil – atualização 2025*. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Paginas/Plataforma-inova-e-panorama-dos-investimentos-de-inovacao-em-energia-no-Brasil.aspx>. Acesso em: 3 nov. 2025.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Nota Técnica EPE/DEA/SEE/2024/18. Atlas da Eficiência Energética Brasil: Manual Metodológico – Dados e Indicadores. EPE, 2024.

FEAM. Estratégia de Transição Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <https://feam.br/estrat%C3%A9gia-estadual-de-transi%C3%A7%C3%A3o-energ%C3%A9tica>. Acesso em: 26 nov. 2025.

FEAM. Plano de Energia e Mudanças Climáticas. Belo Horizonte, 2015.

GIZ; MME. Mecanismos de Eficiência Energética. Brasília: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2023.

GUZZO, Giovane Simões. Predição da eficiência de calcinação baseado em variáveis de entrada do forno de cal em uma indústria de celulose. 2024.

INDUSTRY, Agora et al. Low-carbon technologies for the global steel transformation. In: A Guide to the Most Effective Ways to Cut Emissions in Steelmaking. Agora industry, 2024.

INSTITUTO E+. Atlas do Futuro Industrial do Brasil 2025: caminhos e oportunidades para uma nova economia de baixo carbono. Coord. Stefania Gomes Relva; Clauber Leite; Drielli Peyerl. São Paulo: Instituto E+, 2025. ISBN 978-65-84181-00-7.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Energy Efficiency Progress Tracker – Data Tools*. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-efficiency-progress-tracker>. Acesso em: 2 nov. 2025

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: COPPE/UFRJ, 2022.

LIMA, Ísis Rita Zambom de; FORTUNATO, Gabrielly de Oliveira. Análise da correlação entre a granulometria e o teor de CO₂ na cal virgem produzida em uma indústria: um estudo de caso. 2025.

Mapa estratégico da indústria 2023: o caminho para a nova indústria. Brasília, DF: CNI, 2023. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2023/5/mapa-estrategico-da-industria-2023/>. Acesso em: 30 out. 2025.

MINAS GERAIS (Estado). 4º inventário de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa: Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Governo do Estado de Minas Gerais; FEAM; SEMAD; CDP Latin America; ICLEI América do Sul, 2022. 1 arquivo PDF.

MINAS GERAIS. Plano Estadual de Ação Climática (PLAC-MG). Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <https://www.mg.gov.br>. Acesso em: 09 set. 2025.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico (SEDE). Plano Estadual de Mineração – PEM-MG. Belo Horizonte: SEDE, 2024.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil: 6ª edição. MCTI, 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME); EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Minuta – Caderno A: Eixos Norteadores de Eficiência Energética no Brasil. Brasília: MME/EPE, 2024

Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Eficiência Energética – PNEf. MME, 2011.

MYRTAJ, Romeo. Sostenibilità Ambientale in Edilizia: Guida al Retrofit Energetico e Proposte per un Nuovo Modello Normativo= Environmental Sustainability in Building: A Guide to Energy Retrofit and Proposals for a New Legislative Model. 2025. Tese de Doutorado. Politecnico di Torino.

PRICEWATERHOUSECOOPERS (PwC). Siderurgia e Metalurgia no Brasil: 13ª edição. PwC Brasil, 2023.

REIS, Ruibran Januário dos; TIBA, Chigueru (Org.). Atlas Solarimétrico de Minas Gerais – Volume II. Belo Horizonte: Editora Futura Express, 2016. 236 f.

ROCHA, Paulo; CARDEIRA, Alfredo. Transição Energética e Descarbonização: eficiência, competitividade e inovação na indústria de cimento nacional. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, n. 16, p. 117-126, 2021.

RODRIGUES, Thaís Fátima et al. Análise de indicadores-chave dos relatórios de sustentabilidade de indústrias de cimento do Brasil.

SANTOS FILHO, Paulo Sérgio dos. Uma visão geral da eficiência energética na indústria e contribuições das metodologias: ciclo PDCA, 5W2H e WCM. 2021.

SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – Observatório do Clima (OC), 2024/v12.0. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/...> Acesso em: 3 out. 2025.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS DE PERNAMBUCO (SEBRAE-PE). Manual de eficiência energética para indústrias. Pernambuco, 2022.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Relatório anual, 2022. [S.l.: s.n.], 2022.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Relatório anual 2022. [S.l.]: SNIC, 2022.

TENFEN, Daniel. Eficiência energética na indústria: volume 2 [recurso eletrônico]. Florianópolis: ENBPar; IFSC, 2023. 128 p. il. color. (Projeto EnergiF, v. 2). ISBN 978-65-981191-2-.

VELÁSQUEZ, Roberto; CALILI, Rodrigo Flora; RISCHTER, Douglas; LEITE, Felipe; DANTAS, Guilherme; GAMA E SOUZA, Maria Fátima L.; ARAGÃO, Raymundo; FERREIRA, Renato; LIMA, Ricardo; SANTOS, Samuel; ROCHA, Isabella. Estimativas do potencial de mercado para eficiência energética térmica nas indústrias. Série 1, Volume 1. Brasília: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ); Facto Energy/PUC-Rio, 2023. Disponível em: PotencializEE – Acervo. Acesso em: 30 out. 2025.

VISEDO, Gonzalo; PECCHIO, M. Roadmap tecnológico do cimento. Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até, v. 2050, p. 43-48, 2019.

DESENVOLVIMENTO
ECONÔMICO



**GOVERNO
DE MINAS**

AQUI O TREM PROSPERA.