

Plano Estadual de Hidrogênio de Baixa Emissão (PEH2BE)

**Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico
de Minas Gerais**

SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO

Mila Batista Leite Corrêa da Costa
Secretária de Estado

Frederico Amaral e Silva
Secretário Adjunto

Bruno Araújo Oliveira
Secretário Executivo

SUBSECRETARIA DE PROMOÇÃO DE INVESTIMENTOS E CADEIAS PRODUTIVAS

Daniel Guimarães Medrado de Castro

SUPERINTENDÊNCIA DE POLÍTICA MINERÁRIA, ENERGÉTICA E LOGÍSTICA

Raphael Evaristo Rodrigues

DIRETORIA DE ENERGIA

Gustavo Caetano Ribeiro de Melo

EQUIPE TÉCNICA

Adriel Lemos Ferreira

Estagiário da Diretoria de Energia

Luíza Delgado Vieira

Assessora da Diretoria de Energia

Maria Jose Charfuelan Villarreal

Assessora da Diretoria de Energia

Ronnie Eustaquio Oliveira

Assessor da Diretoria de Energia

Diego Otávio Portilho Jardim

Assessor da Diretoria de Energia

Thaís Galdino

Assessora da Diretoria de Energia

Sumário

1. Introdução	7
2. Potencial de Minas Gerais.....	11
2.1 Matriz elétrica limpa e renovável	15
2.1.1 Energia solar fotovoltaica em Minas Gerais.....	16
2.1.2 Potencial mineiro para bioenergéticos.....	19
2.2 Economia favorável ao hidrogênio	22
2.3 Posição privilegiada no país	23
2.3.1. Malha ferroviária e rodoviária	25
2.4 Universidades em destaque e centros de pesquisa de referência em desenvolvimento tecnológico e produção de conhecimento.....	27
2.5 Avanços em relação ao H2BE no Brasil e em Minas Gerais	28
2.5.1 Iniciativas da CEMIG	33
3. Setores Alvo.....	34
3.1 Indústria siderúrgica	34
3.2 Indústria de mineração.....	37
3.3 Indústria de cimento	40
3.4 Indústria de fertilizantes e agrícola.....	41
3.5 Indústria de transportes.....	42
3.6 Articulações Estratégicas para a Produção e Consumo de Hidrogênio em Minas Gerais.....	44
4. Estudo do ambiente regulatório	46
5. Papel da PD&I	49
6. Rotas de produção	56
7. Desenvolvimento de infraestrutura.....	62
8. Incentivo à produção	63
9. Estímulo da demanda	68
10. Hubs de hidrogênio.....	70
10.1 Hub Mineiro de hidrogênio de baixa emissão	71
11. Diretrizes	73
12. Metas do Plano Estadual de hidrogênio de baixa emissão.....	74
13. Estágios do Plano Estadual de hidrogênio de baixa emissão	77
14. Conclusão.....	79
15. Referências	81

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Evolução dos investimentos atraídos para MG em bilhões de reais	12
Gráfico 2 - Matriz elétrica de Minas Gerais	15
Gráfico 3 - Ranking dos estados brasileiros com maior potência instalada e prevista em energia solar fotovoltaica (MW).....	17
Gráfico 4 - Potência Outorgada em Geração Centralizada do Tipo UFV por Estado (GW)..	18
Gráfico 5 - Geração centralizada e distribuída de energia solar fotovoltaica (em MW)	18
Gráfico 6 - Ranking do crescimento na geração solar fotovoltaica em 2024 (em kW)	19
Gráfico 7 - Evolução anual do nº de plantas em operação e produção de biogás	21
Gráfico 8 - Geração de energia a partir de biomassa (em MW).....	22
Gráfico 9 - LCOH Benchmark, 2030 USD/kgH ₂	30
Gráfico 10 - Estimativas das emissões setoriais, em CO ₂ eq (GWP 100 anos, SAR IPCC, 1995), de 1990 a 2016.....	35
Gráfico 11 - Emissões de CO ₂ do setor Processos Industriais, de 1990 a 2016	35
Gráfico 12 - Produção somada de ferro-gusa, aço bruto, laminados e semiacabados em 2022	36
Gráfico 13 - Representatividade no VA das indústrias extrativas e de transformação na indústria e na economia de Minas Gerais	38
Gráfico 14 - Composição do VA do Estado de Minas Gerais por atividade econômica em 2019	39
Gráfico 15 - Participação das unidades da federação no VA da Indústria Extrativa Mineral	39
Gráfico 16 - Emissões do setor IPPU (2), de 1990 a 2020, em CO ₂ eq	41
Gráfico 17 - Projeção da Frota de Veículos Leves 2022-2031	43
Gráfico 18 - Componentes do Sistema de Eletrólise com maior Contribuição no Custo Total	55
Gráfico 19 - Componentes do Sistema de Eletrólise com maior Potencial de Redução de Custos	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de hidrogênio e classificação por cores.....	8
Tabela 2 - Ranking Mercado Consumidor no Brasil	11
Tabela 3 - Metas PLAC- MG	13
Tabela 4 - EE e PR anuais para as 12 mesorregiões de MG estabelecidas pelo IBGE	24
Tabela 5 - Potencial de hidrogênio na América Latina	30
Tabela 6 - Produção agrícola de Minas Gerais em 2023	42
Tabela 7 - Estratégias de articulação com as indústrias	45
Tabela 8 - Classificação de rotas tecnológicas para produção de hidrogênio	60
Tabela 9 - Detalhamento TTS para Hidrogênio em Minas Gerais	64
Tabela 10 - Cronograma de atividades do Plano Estadual de hidrogênio de baixa emissão	74
Tabela 11 - Etapas do PEH2BE	78

Lista de Figuras

Figura 1- PLAC-MG	13
Figura 2 - Total diário da irradiação global horizontal, média anual	16
Figura 3 - Distribuição solar global diária média anual	24
Figura 4 - Mapa da Malha Ferroviária de Minas Gerais	25
Figura 5 - Mapa da Malha Rodoviária de Minas Gerais	26
Figura 6 - Localização dos projetos anunciados	37
Figura 7 - Potencial de uso do hidrogênio de baixa emissão na mineração	40
Figura 8 - Ciclo produtivo do H ₂ V	56
Figura 9 - Ciclo produtivo do H ₂ V	57
Figura 10 - Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio	58
Figura 11 - Acoplamento de setores usando energia elétrica renovável como fonte de energia e hidrogênio como o vetor para diferentes aplicações	58
Figura 12 - Principais localizações para projetos anunciados no Brasil	63
Figura 13 - Principais empresas da Cadeia do Hidrogênio	67
Figura 14 - Previsão para 2040 da demanda doméstica brasileira de hidrogênio em milhões de toneladas.....	68

1. Introdução

Minas Gerais apresenta uma matriz elétrica extremamente limpa, possibilitando ao estado produzir o hidrogênio de baixa emissão (H2BE) a partir de diferentes fontes e rotas (Aneel, 2023).¹

O hidrogênio começou a ser utilizado como uma solução viável na década de 1970, após a primeira grande crise petrolífera. Como combustível, ele tem vários atributos que justificam sua relevância no cenário atual: pode ser encontrado abundantemente na natureza, não é tóxico ao meio ambiente, dissipa-se facilmente e pode ser armazenado (Gurlit et al, 2021). Nesse sentido, o principal atributo do hidrogênio é ser um carregador de energia, o que permite certa flexibilidade para o seu uso.

O hidrogênio é considerado um vetor energético com potencial para ajudar na descarbonização de setores intensivos em energia, como indústrias pesadas e no transporte marítimo e aéreo, muitos dos quais têm elevada relevância na economia mineira, como é o caso da siderurgia. Pode, portanto, apoiar a descarbonização de sua cadeia produtiva, permitindo que Minas Gerais se posicione como fabricante de produtos verdes.

Segundo a publicação de 2022, “[Brasil prepara-se para iniciar produção de hidrogênio verde](#)”, da Pesquisa FAPESP “o hidrogênio tem alto poder calorífico - quase três vezes superior ao do diesel, da gasolina e do gás natural. Ao ser transformado em energia, alimentando um motor a combustão ou em qualquer outra aplicação, não emite gases de efeito estufa (GEE). Logo, o hidrogênio residual liberado na atmosfera, em contato com o oxigênio, resulta em vapor d’água”. O combustível ainda pode ser utilizado para estabilizar a rede elétrica e permitir a integração de mais energias renováveis.

O hidrogênio pode ser produzido a partir de diversas fontes, seja por meio de reações químicas, como a eletrólise, durante a produção de outras substâncias (como etanol) ou até do próprio ar. Quando ele é obtido por meio de processos também sustentáveis, como produção por meio de um processo abastecido por fontes renováveis, como pela energia solar e eólica, é chamado de “Hidrogênio Verde”. Dessa forma, ele é classificado por cores a depender da fonte de energia utilizada para a sua obtenção, conforme a seguir.

¹ A escolha pelo uso neste Plano do termo hidrogênio de baixa emissão (H2BE), ao contrário de Hidrogênio Verde, se dá por abarcar outros métodos, nos quais o Estado de Minas Gerais tem também elevado potencial, mas mantendo as emissões de carbono em um patamar próximo ou igual a zero. Assim, para efeitos deste Plano, estende-se por H2BE, além do hidrogênio produto da eletrólise da água sustentada a partir de energia renovável, ou seja, o hidrogênio comumente denominado hidrogênio verde, o hidrogênio resultado da reforma da biomassa ou do biometano, chamado hidrogênio musgo, que, por sua vez, Minas é um dos estados com maior capacidade de produção.

Tabela 1 - Tipos de hidrogênio e classificação por cores

Tipo	Fonte	Processo de Produção	Considerado uma fonte limpa?
Hidrogênio verde	Água	Separação da água em H ₂ e O ₂ em um processo de eletrólise com fonte geradora renovável	SIM
Hidrogênio Amarelo	Água	Separação da água em H ₂ e O ₂ em um processo de eletrólise com fonte geradora que for disponível na rede elétrica	PARCIALMENTE (Depende da composição da matriz energética)
Hidrogênio Rosa	Água	Separação da água em H ₂ e O ₂ em um processo de eletrólise com fonte geradora nuclear	PARCIALMENTE (Em termos de emissões de gases de efeito estufa é fonte de energia limpa, porém há um debate com relação aos manejo dos resíduos e risco de acidentes nucleares)
Hidrogênio de biomassa ou hidrogênio Musgo	Biomassa ou biocombustível	Reforma catalítica, gaseificação ou digestão anaeróbica com ou sem captura, utilização e armazenamento de carbono	PARCIALMENTE (A captura não se apresenta obrigatória, podendo haver escape de gases)
Hidrogênio Azul	Gás Natural	Similar ao hidrogênio cinza, mas com sequestro/armazenamento do CO ₂	PARCIALMENTE (A depender da destinação final desse CO ₂ e a origem da energia utilizada no processo)
Hidrogênio Turquesa	Gás Natural	Há separação do gás metano que é utilizado como própria fonte de energia	PARCIALMENTE (A queima de gases pode ser incompleta, liberando GEEs na atmosfera)
Hidrogênio Cinza	Gás Natural	Separação natural do gás em H ₂ e CO ₂	NÃO
Hidrogênio Preto ou Marrom	Carvão	Processo de gaseificação do carvão mineral	NÃO

Fonte: Elaboração própria, 2022

A forma mais comum de hidrogênio hoje em dia é o chamado hidrogênio cinza, que é produzido a partir do gás natural. Quando o CO₂ resultante é capturado e armazenado, ele é chamado de hidrogênio azul - que é menos poluente.

O Brasil tem a oportunidade de se tornar um dos líderes mundiais na produção de hidrogênio de baixa emissão, pois possui abundante potencial de energia eólica e solar, uma rede elétrica integrada de baixo carbono e vantagens geográficas para exportar para a Europa e a costa leste da América do Norte, além de uma indústria nacional significativa, sendo um dos lugares mais competitivos do mundo para a sua produção.

Segundo a [Mckinsey & Company](#) (2021), o Custo Nivelado do Hidrogênio Verde (LCOH) produzido no Brasil seria de aproximadamente USD 1,50/kg em 2030. Em 2040, este custo poderia cair para aproximadamente US\$1,255/kg.

Levando-se em conta todo esse contexto de competitividade e a demanda global prevista, a cadeia do Hidrogênio poderá gerar um total de USD 15-20 bilhões em receitas até 2040, a maioria (USD 10-12 bilhões) para atender o mercado doméstico, especialmente caminhões, produção de aço e outras indústrias intensivas em energia. Outros USD 4-6 bilhões poderiam vir das exportações de derivados de hidrogênio verde para os EUA e Europa, já que os custos de desembarque do hidrogênio verde brasileiro seriam competitivos em relação às exportações de outros países (Gurlit et al, 2021).

Ainda segundo a Mckinsey & Company (2021), para possibilitar um cenário tão acelerado, cerca de 200 bilhões de dólares devem ser investidos em hidrogênio verde nas próximas décadas para fazer frente à demanda.

Portanto, o papel-chave do Governo do Estado será de proporcionar as condições necessárias para transformar Minas Gerais em um ambiente fértil para o desenvolvimento de tecnologia, atração de investimento e desenvolvimento de projetos em hidrogênio de baixa emissão.

O Plano Estadual de hidrogênio de baixa emissão (PEH2BE) tem como objetivos gerais a adesão da economia mineira ao H2BE, gerando, assim, crescimento econômico, renda e empregos verdes. Em congruência com os compromissos do Estado pactuados pelo Race to Zero de zerar as emissões líquidas de GEE até 2050, o PEH2BE almeja descarbonizar a economia do estado e atrair investimentos sustentáveis para Minas Gerais.

O PEH2BE permitirá ao hidrogênio de baixa emissão se tornar vetor de descarbonização da economia de Minas Gerais para que ela se posicione como referência nacional no desenvolvimento de produtos verdes, além de protagonista na cadeia do hidrogênio de baixa emissão. Para alcançar o objetivo, será utilizada da extrema competência que o Estado já possui no campo das energias renováveis, principalmente em relação à sua vocação para com o biogás e biometano e seu pioneirismo na geração solar fotovoltaica.

Primeiramente, este documento trará uma contextualização sobre o porquê do potencial mineiro para o hidrogênio de baixa emissão, como uma matriz elétrica limpa, uma economia favorável ao hidrogênio, uma localização privilegiada no centro do país e centros de pesquisa de referência localizados no estado. Em seguida, serão descritos os principais setores do estado

com potencialidade para a adesão ao hidrogênio, sendo eles a siderurgia, a mineração, a indústria cimenteira, de fertilizantes/agrícola e de transporte. Por fim, no subcapítulo 3.6, serão discutidas algumas das articulações estratégicas, segmentadas por setor, que o Governo vem adotando, visando o fomento da produção e do consumo de Hidrogênio em Minas Gerais.

Ademais, o Plano Estadual destaca individualmente as seis importantes frentes que visam aprimorar a cadeia produtiva do estado: estudo do ambiente regulatório, papel do PD&I, rotas de produção, desenvolvimento da infraestrutura, incentivos à produção e estímulo à demanda. Em seguida, será enfatizado a criação de *hubs* regionais de hidrogênio de baixa emissão, ou seja, polos logísticos de produção e distribuição do H2BE, de acordo com a potencialidade local.

Por fim, serão destacadas as metas e etapas do Plano, estruturando, assim, o seu cumprimento ao longo do tempo.

2. Potencial de Minas Gerais

Minas Gerais ocupa uma área de 586.528 km², sendo a quarta maior unidade da Federação em extensão territorial, o que representa 7% do território brasileiro e supera países como Espanha e França. Além de sua vasta dimensão, o estado se destaca economicamente: é o segundo mais populoso do Brasil, com 21 milhões de habitantes, e o segundo maior mercado consumidor, respondendo por 10,24% do mercado nacional². A Tabela 2 representa o amplo mercado consumidor que Minas Gerais possui.

Tabela 2 - Ranking Mercado Consumidor no Brasil

Estado	Potencial de consumo (R\$ Bi)	Participação	Ranking
São Paulo	1.179,73	26,42%	1
Minas Gerais	457,44	10,24%	2
Rio de Janeiro	430,70	9,65%	3
Rio Grande do Sul	304,22	6,81%	4
Paraná	292,16	6,54%	5
Brasil	4.465,20	100%	-

Fonte: Invest Minas, 2025

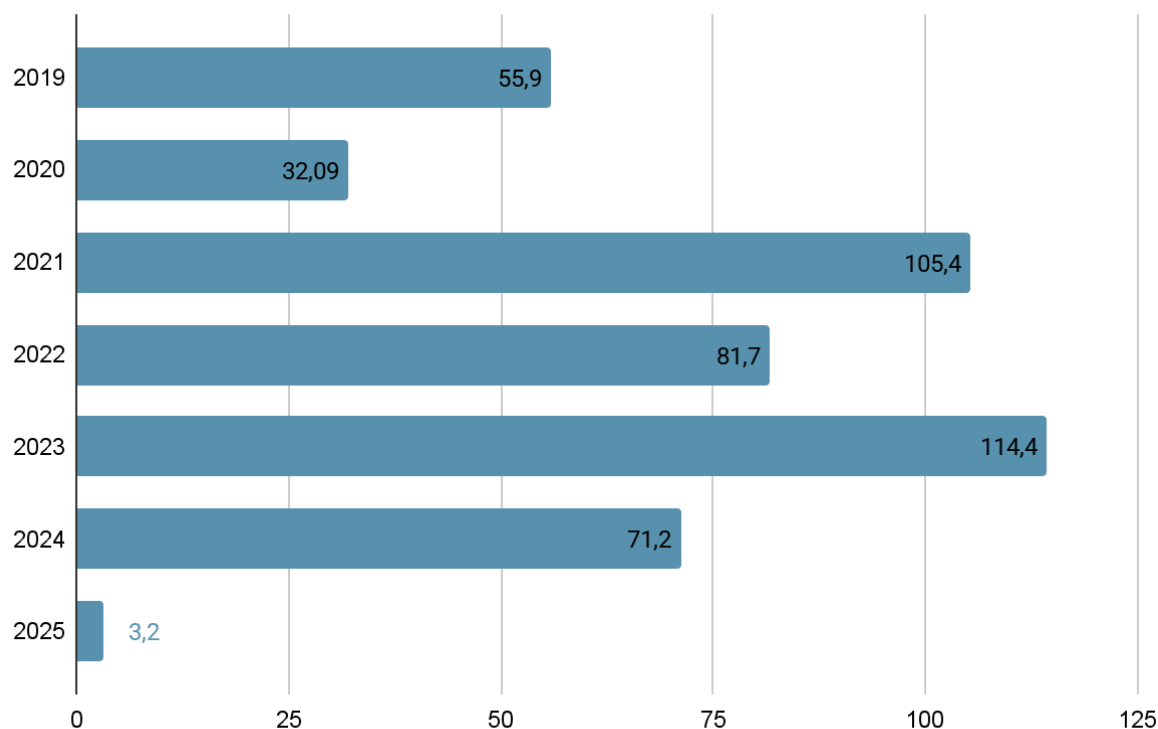
No comércio exterior, Minas Gerais foi o terceiro maior exportador do país em 2022, com US\$40 bilhões em exportações, equivalentes a 12% do total nacional. Sua relevância industrial também é expressiva, abrigando o segundo maior parque industrial do Brasil, responsável por 11% da produção nacional. Esses fatores consolidam Minas Gerais como a terceira maior economia do país, com um PIB de R\$906,7 bilhões, a preços de mercado corrente, em 2022 (Fundação João Pinheiro, 2024).

Dito isso, a economia pujante e diversificada do estado permite a aderência de diversas novas oportunidades, como o hidrogênio de baixa emissão. Em relação à produção nacional, o estado corresponde a mais de 50% da produção de minerais metálicos, mais de 30% de toda a produção mineral, além de ser o maior produtor de ferro-gusa, ligas metálicas e aço e segundo maior produtor de veículos e de peças de veículos.

No que se refere à atração de investimentos, Minas Gerais captou R\$463,89 bilhões entre janeiro de 2019 e fevereiro de 2025, conforme ilustrado no Gráfico 1. Somente em 2024, foram atraídos 233 projetos, beneficiando 116 municípios. O ano de maior volume de investimentos foi 2023, com 195 projetos que somaram R\$114,4 bilhões e impactaram 203 municípios. Por fim, até fevereiro de 2025, os investimentos captados no ano alcançaram aproximadamente R\$3,2 bilhões.

² Segundo dados da Invest Minas.

Gráfico 1 - Evolução dos investimentos atraídos para MG em bilhões de reais



Fonte: Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, Diretoria de Atração de Investimentos e Diversificação Econômica, 2025

Minas Gerais já vem se posicionando em relação ao combate às emissões de carbono e reafirmando seu pioneirismo na gestão ambiental e econômica. Em junho de 2021, se tornou o primeiro governo subnacional da América Latina e do Caribe a aderir à campanha “*Race to Zero*”. Tal campanha é uma iniciativa global que, por sua vez, busca zerar as emissões líquidas de GEE até 2050, o que deverá limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C graus. Assim, a meta será alcançada por meio da intensificação de ações de descarbonização, da atração de investimentos para negócios sustentáveis e da criação de empregos verdes.

Além disso, Minas Gerais atua sob outras iniciativas de descarbonização de sua economia. Primeiramente, o [Plano de Ação Climática do Estado de Minas Gerais \(PLAC-MG\)](#) foi desenvolvido com o objetivo de estabelecer diretrizes e ações estratégicas para o enfrentamento das mudanças climáticas pelo Governo do Estado de Minas Gerais, alinhado com aquilo que é necessário em nível local para contribuir com a comunidade global no que se refere às fontes das causas do fenômeno das mudanças climáticas, através de uma trajetória viável para alcançar a neutralidade de emissões líquidas de GEE no estado até 2050, além de contribuir no avanço da proteção, adaptação e resiliência do território estadual frente às principais ameaças e riscos decorrentes dos cenários climáticos futuros.

Exemplificado na Figura 1, sua elaboração priorizou o processo participativo dos diversos segmentos da sociedade, como órgãos e entidades da administração pública, setor privado,

organizações não governamentais e sociedade civil, envolvendo todas as temáticas necessárias para uma ação climática ampla e integrada: energia, transporte, resíduos, indústria, biodiversidade e ecossistemas, segurança hídrica, segurança alimentar e nutricional, gestão de risco de desastres, dentre diversos outros.

Figura 1- PLAC-MG



Fonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM, 2023

Dentre as diversas metas estabelecidas pelo PLAC-MG, algumas estão diretamente relacionadas ao PEHBE, abrangendo ações estratégicas para seu desenvolvimento e implementação. Elas estão retratadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Metas PLAC- MG

META	SETOR	DESCRIÇÃO
Meta 2.1.	INDÚSTRIA	Realizar ações de promoção da ampliação do potencial técnico-econômico da aplicação de rotas de captura e armazenamento de carbono nos processos industriais, em especial relacionados à produção de biocombustíveis.
Meta 2.2.	INDÚSTRIA	Prover instrumentos tributários, financeiros e creditícios para incentivo à adoção da tecnologia de captura e armazenamento de carbono nos processos industriais.
Meta 2.3.	INDÚSTRIA	Alcançar 60% do setor de produção de biocombustíveis com unidades de captura de carbono instaladas.
Meta 3.1.	INDÚSTRIA	Reduzir a emissão específica (tCO ₂ /t produto) na produção de cimento referente ao ano de 2020.

Meta 3.2.	INDÚSTRIA	Aumentar o uso de adições e substitutos de clínquer e do uso de combustíveis alternativos na produção de cimento.
Meta 3.3.	INDÚSTRIA	Reduzir a emissão específica (tCO ₂ /t produto) na produção siderúrgica referente ao ano de 2020.
Meta 2.3.	INDÚSTRIA	Alcançar 60% do setor de produção de biocombustíveis com unidades de captura de carbono instaladas.
Meta 3.4.	INDÚSTRIA	Inserção e ampliação do uso do hidrogênio, ou outras tecnologias de baixo carbono, em processos industriais para a substituição de combustíveis e materiais, em especial na produção siderúrgica.
Meta 4.1.	INDÚSTRIA	Acesso a linhas de crédito com taxas diferenciadas para projetos de redução de emissões.
Meta 4.3.	INDÚSTRIA	Pacotes de estímulo financeiro a linhas de pesquisa científica e inovação.
Meta 4.4.	INDÚSTRIA	Redução de alíquotas de importação para equipamentos importados - sem similar nacional - que promovam a mitigação de CO ₂ .
Meta 1.1	TRANSPORTE	Promover a ampliação da substituição da gasolina e do diesel por biocombustíveis, ampliando em 10% sua participação na demanda energética até 2030 e em 50% até 2050.
Meta 2.1.	TRANSPORTE	Alcançar 900 mil veículos movidos por propulsão alternativa à combustão até 2050 na frota veicular registrada no Estado.
Meta 3.1.	ENERGIA	Desenvolver o Programa Estadual de Tecnologias de Baixo Carbono e Eficiência Energética.
Meta 3.2.	ENERGIA	Lançar o Programa Estadual de Tecnologias de Baixo Carbono e Eficiência Energética.
Meta 3.1.	ENERGIA	Ampliar a capacidade instalada de autogeração de energia elétrica a partir de fontes renováveis em consumidores de grande porte, a cogeração com fonte não fóssil e o uso de energia residual na indústria.
Meta 5.1.	ENERGIA	Aumentar a produção e o uso de biogás e biometano para consumo energético em substituição ao consumo de energia fóssil.
Meta 4.1.	ENERGIA	Expandir a capacidade instalada para geração de 5,9 GW até 2030 e 18,9 GW até 2050, através de Usinas Fotovoltaicas centralizadas.
Meta 4.4.	ENERGIA	Expandir a capacidade instalada para geração de 3,1 GW até 2030 e 2,8 GW até 2050, através por Usinas Termelétricas a biomassa.
Meta 2.1.	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	Formar um grupo de trabalho e realizar estudos sobre viabilidade da criação de linhas de crédito.

Fonte: Elaboração própria, PLAC (2025).

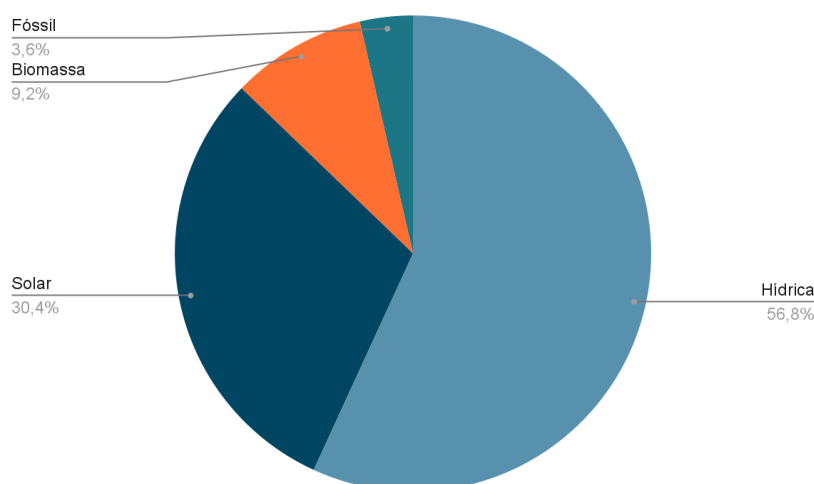
Outra iniciativa do Estado de Minas Gerais está na [Rota de Descarbonização](#). A Rota se trata de uma aliança entre os principais atores da economia de Minas Gerais para acelerar a transição para uma economia de baixo carbono, potencializar investimentos e empregos verdes e aumentar a competitividade dos produtos mineiros no mundo, engajando governos, o setor privado e a comunidade.

Conforme será destacado a seguir, o estado possui amplo potencial para a produção de hidrogênio de baixa emissão. Quatro pontos aqui se destacam: a presença de uma matriz elétrica limpa e renovável, uma economia favorável ao hidrogênio, uma posição privilegiada no país e, enfim, por possuir um sistema educacional em destaque.

2.1 Matriz elétrica limpa e renovável

Em primeiro lugar, a matriz elétrica do estado, em fevereiro de 2025, observada no Gráfico 2, é composta por 53,19% de usinas hidrelétricas de energia (UHE), 30,4% de centrais geradoras fotovoltaicas (UFV), 12,46% de centrais geradoras termelétricas (UTE), 3,26% de pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e 0,69% de centrais geradoras hidrelétricas (CGH). Com 898 empreendimentos em operação considerando todas as fontes de energia, 23,8 GW de potência outorgada em operação e 96,4% da matriz elétrica renovável, Minas está hoje na fronteira da energia renovável, criando milhares de empregos verdes e assumindo o compromisso com a descarbonização de sua economia.

Gráfico 2 - Matriz elétrica de Minas Gerais



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da Aneel (fev. 2025)

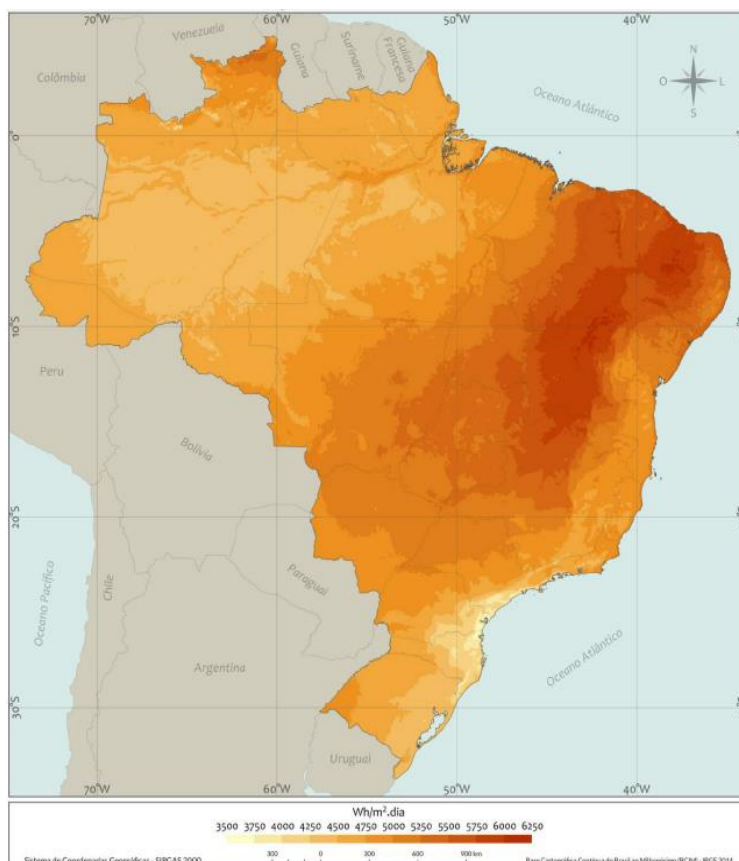
Além dos 23,8 GW de potência outorgada total em operação, Minas conta com mais 35,45 GW de potência planejados ou em construção, dos quais a geração solar representa a quase totalidade (98%). No que tange a geração solar centralizada, o estado possui 7,2 GW de

potência outorgada total em operação e 34,8 GW que estão em fase de construção ou com a construção não iniciada. Já em relação à geração solar distribuída, Minas possui 4,57 GW de potência instalada em fevereiro de 2025.

2.1.1 Energia solar fotovoltaica em Minas Gerais

Segundo o [Atlas Brasileiro de Energia Solar \(2017\)](#) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), dentro do Brasil, Minas Gerais é um dos estados que mais se destacam pelo seu potencial para geração solar. No chamado Cinturão Solar, faixa que vai do Nordeste brasileiro ao Pantanal, estão os maiores índices de irradiação solar no país, particularmente no trecho entre a metade norte de Minas e o sertão baiano. A irradiação global horizontal média anual está disposta na Figura 2 abaixo, do Atlas Brasileiro de Energia Solar do INPE, onde pode-se perceber a prevalência dessa região.

Figura 2 - Total diário da irradiação global horizontal, média anual



Fonte: INPE, 2017.

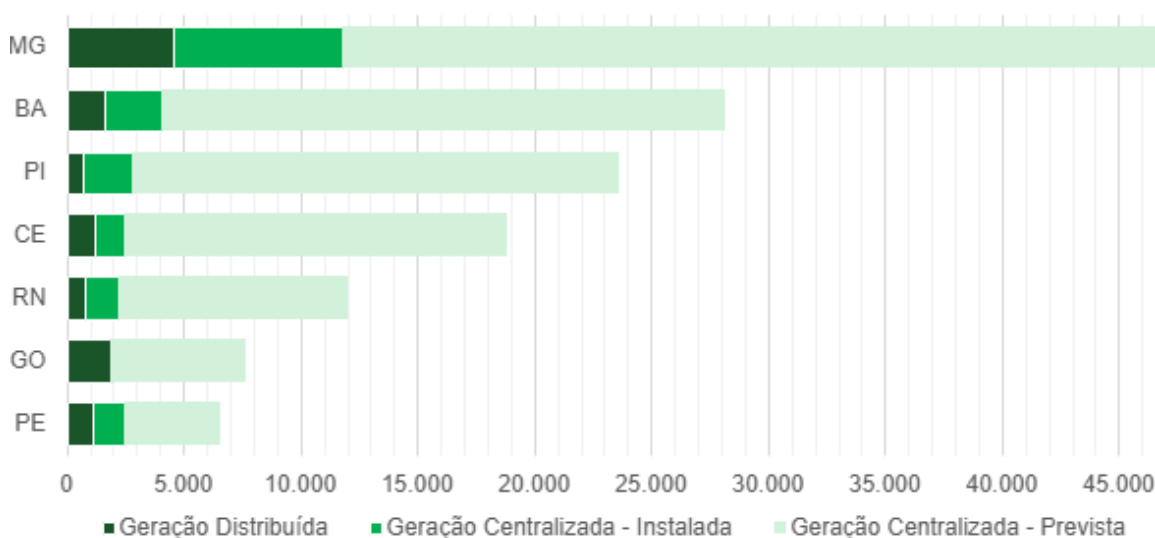
Dentro do estado de Minas Gerais, a irradiação solar média varia entre 4,5 e 6,5 $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ de acordo com o [Atlas Solarimétrico de Minas Gerais](#) da Companhia Energética de Minas Gerais S.A (CEMIG), com os valores mais elevados sendo encontrados nas mesorregiões Norte, Noroeste e Jequitinhonha, que apresentam condições geográficas, climáticas e meteorológicas propícias, como menos nuvens e chuvas e maior insolação. A título de

comparação, países referência em geração solar como o Japão e a Alemanha possuem valores máximos de 4,27 e 3,34 kWh/m²/dia, respectivamente, segundo o [Global Solar Atlas](#), o que torna o local menos ensolarado de Minas Gerais significativamente mais favorável para a tecnologia que os locais mais ensolarados desses países.

Para transformar esse potencial natural da energia solar em protagonismo no setor, foi essencial desenvolver políticas públicas que ofereçam o suporte necessário para sua expansão e consolidação. Em 2019, foi criado o Projeto Estratégico Sol de Minas, com a finalidade de alavancar o protagonismo de Minas Gerais no setor de energia solar fotovoltaica. Suas frentes de atuação incluem a elaboração de incentivos fiscais para o setor, a simplificação dos procedimentos de licenciamento ambiental para empreendimentos solares, a capacitação de gestores municipais em políticas de energia solar e a criação do [Mapa de Disponibilidade de Rede](#) junto à CEMIG, mostrando assim a disponibilidade das subestações do estado para injeção de geração distribuída.

Essas, dentre outras medidas, levaram Minas Gerais à posição de protagonista nacional na geração solar. Desde a implementação do projeto, Minas passou de 518 MW de potência instalada em energia solar fotovoltaica, em 2018, para mais de 11.776 MW em 2025, um crescimento superior a 22 vezes, o maior número dentre os estados brasileiros. Minas Gerais representa hoje 21,7% de toda a energia solar gerada no Brasil, quando somadas a geração centralizada e distribuída. Quando considerada ainda a potência outorgada ou prevista, que inclui os empreendimentos aprovados, mas não operacionais, a liderança mineira fica ainda maior. Conforme destacado no Gráfico 3, até fevereiro de 2025, Minas Gerais detém uma capacidade outorgada total, somando geração centralizada e distribuída, de 46,6 gigawatts (GW) de energia solar fotovoltaica. O segundo estado com a maior capacidade outorgada para esse tipo de geração é a Bahia, registrando 28,17 GW, seguida pelo Piauí, com 23,6 GW, Ceará, com 18,88 GW, e Rio Grande do Norte, com 12,07 GW.

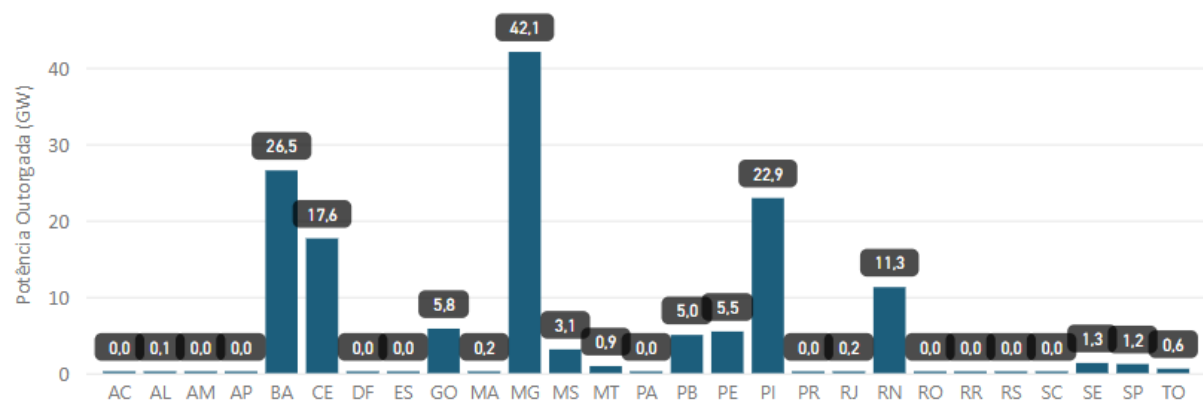
Gráfico 3 - Ranking dos estados brasileiros com maior potência instalada e prevista em energia solar fotovoltaica (MW)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da Aneel (fev. 2025)

A potência outorgada de usinas solares fotovoltaicas centralizadas pode ser visualizada de maneira clara no Gráfico 4.

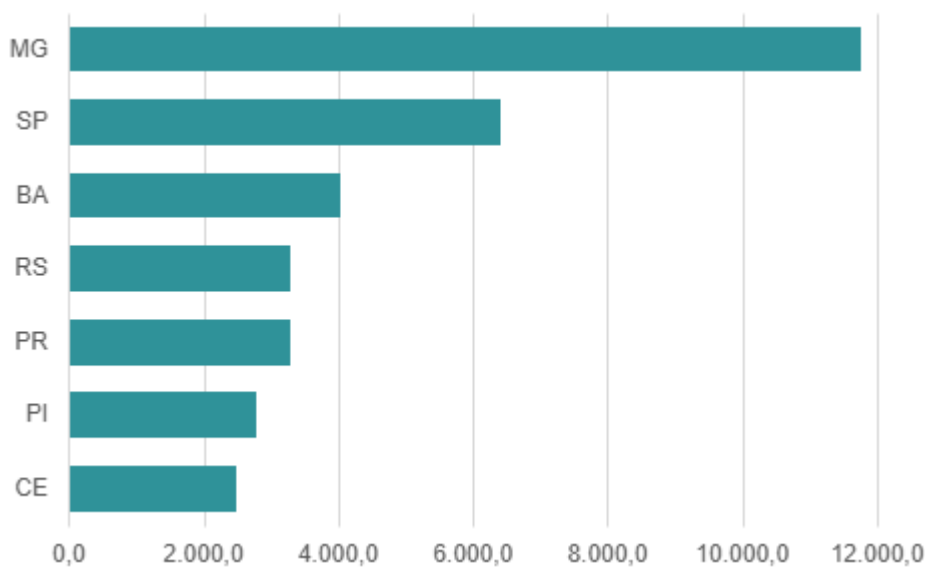
Gráfico 4 - Potência Outorgada em Geração Centralizada do Tipo UFV por Estado (GW)



Fonte: ANEEL, fev. 2025

Em 2025, Minas Gerais atingiu o marco histórico de 11,0 GW de geração solar fotovoltaica em operação. Deste modo, de toda a energia solar produzida no Brasil, cerca de 22% está concentrada em Minas Gerais. É o que aponta o levantamento da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) do Governo Federal, apontada no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Geração centralizada e distribuída de energia solar fotovoltaica (em MW)

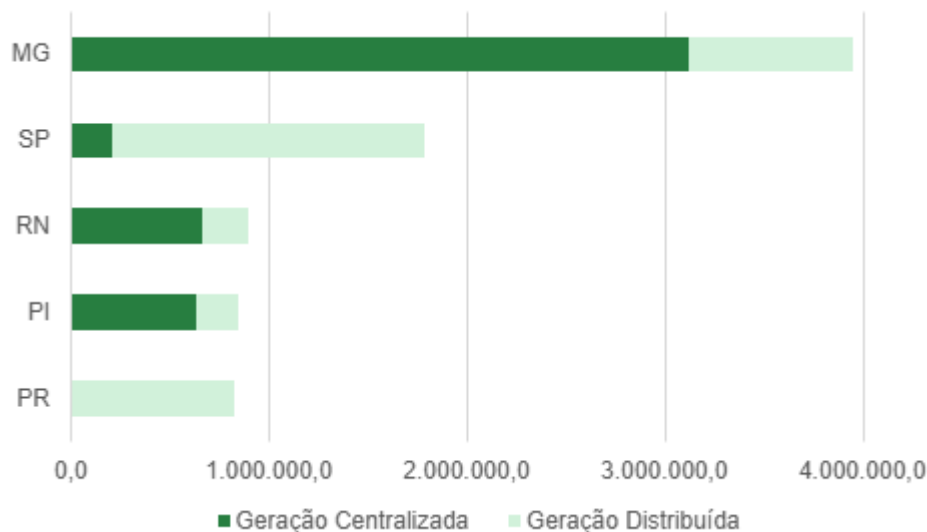


Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da Aneel (fev. 2025)

Somente de janeiro a dezembro de 2024, 3.119 MW de geração centralizada entraram em operação em Minas Gerais nos municípios de Arinos, Betim, Cambuí, Jaíba, Janaúba, Montes Claros, Paracatu, São Gonçalo do Abaeté e Várzea da Palma. Ao mesmo tempo, 832 MW de geração distribuída entraram em operação em todo o estado, totalizando um acréscimo de 3,95 GW de energia solar operacional em Minas, o maior valor dentre todos os estados brasileiros.

Sendo assim, Minas se encontra em primeiro lugar no ranking de crescimento na geração solar fotovoltaica em 2024 (Gráfico 6).

Gráfico 6 - Ranking do crescimento na geração solar fotovoltaica em 2024 (em kW)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da Aneel (fev. 2025)

Por fim, 100% dos 853 municípios de Minas Gerais possuem ao menos uma unidade de geração de energia solar fotovoltaica. Ademais, dos 783 empreendimentos da modalidade centralizada em fase de construção ou com construção não iniciada em Minas Gerais, que serão agregados à matriz energética do estado, 765 são de geração solar fotovoltaica. A marca é importantíssima para entender a posição do estado como referência nacional no setor, sobretudo em um contexto de busca pela manutenção do equilíbrio ambiental e de corrida para zerar as emissões líquidas de GEE.

2.1.2 Potencial mineiro para bioenergéticos

Já em relação ao biogás e biometano, Minas Gerais é vice-líder no país em número de plantas de biogás instaladas, além de corresponder a 9,7% de sua produção nacional, com uma capacidade instalada de 453,95 milhões de Nm³/ano em 2024 (CIBiogás, 2025). Ainda no mesmo ano, segundo o Panorama do Biogás no Brasil (2025), representava 22,7% do total de plantas do Brasil, com 361 das 1587.

De acordo com o [BiogásMap](#), que possui o ano de 2024 como referência, da produção total, 58% vêm de resíduos sólidos urbanos ou esgoto, enquanto 39% vêm da agropecuária, com o restante vindo da indústria.

Segundo o [Brazil Energy Programme](#) (2021), o potencial de produção do biogás em Minas Gerais é estimado de 1,3 bilhão de metros cúbicos por ano, atrás apenas de São Paulo e passível

de ser realizado em até 5 anos. Com esse número garantindo uma produção de 869 milhões de metros cúbicos de biometano por ano, e a projeção de consumo de gás natural distribuído em Minas Gerais sendo de 1,23 bilhão de metros cúbicos, o potencial de produção do estado equivale a 70% do total consumido. Além disso, essa produção de biometano possibilitaria substituir 4,7 bilhões de litros de diesel, 61% do consumo do estado. Por fim, se utilizado para geração, seria possível produzir 19.841 GWh/ano, ou 32,8% de todo o consumo energético do estado.

Para concretizar esse potencial, Minas Gerais se apoia na construção de políticas públicas voltadas ao setor, como a [Lei nº 24.396](#), que dispõe sobre a Política Estadual do Biogás e Biometano e que foi sancionada em julho de 2023. A Política busca incrementar, em bases econômicas, sociais e ambientais, a participação do biogás e do biometano na matriz energética estadual, promovendo uma gestão eficiente dos resíduos sólidos, o desenvolvimento tecnológico, a atração de investimentos, a promoção de incentivos e de fiscalização da cadeia produtiva, dentre outros objetivos.

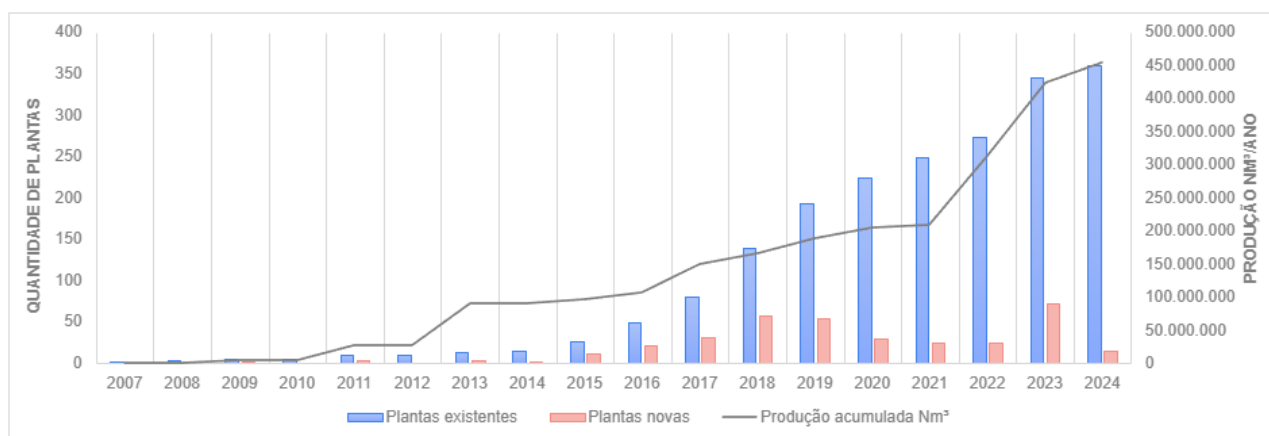
Além disso, foi publicada, em setembro de 2023, a Resolução SEDE nº 34, que “dispõe sobre as condições e critérios para comercialização e distribuição de biometano por redes estruturantes e redes de gás canalizado no Estado, e dá outras providências”. A Resolução versa sobre a política pública intersetorial voltada para a agenda do Biometano no Estado, assim como apresenta as vantagens econômicas, ambientais e sociais advindas da criação de uma política estadual para o tema, de modo a embasar medidas de fomento à cadeia produtiva do Biometano. Dessa forma, o Biometano se torna uma alternativa para a diversificação energética e para a descarbonização da economia mineira.

Entre março e abril de 2023, foi realizada uma Consulta Pública para colher contribuições para o texto, com 356 contribuições recebidas de 11 instituições.

Ademais, encontra-se em vias de ser publicado um Decreto Estadual que institui a Estratégia Estadual do Biogás e Biometano, regulamenta a [Lei nº 24.396](#) e que direcionará a política pública intersetorial para o fomento da cadeia do setor.

Minas Gerais apresenta um crescimento ano a ano do volume de produção e do número de plantas de biogás em operação. Segundo a CIBiogás (2024), cerca de 90% do que é produzido é destinado à energia elétrica. Além disso, entre 2016 e 2024, a produção de biogás no estado mais que quadruplicou. A evolução desses valores pode ser vista no Gráfico 7 abaixo.

Gráfico 7 - Evolução anual do nº de plantas em operação e produção de biogás

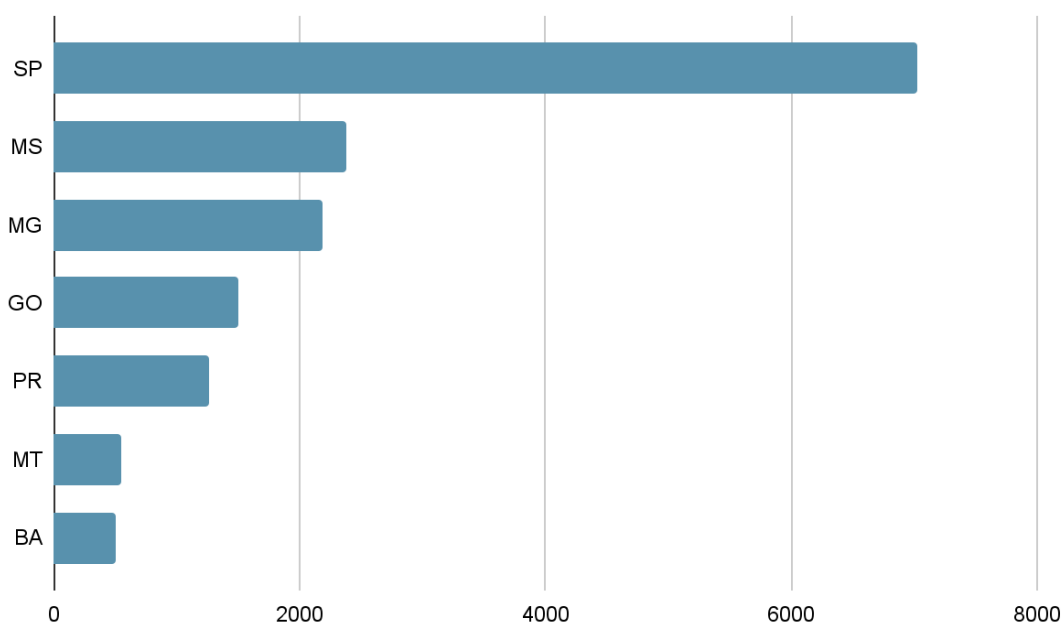


Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da CIBiogás (2025)

Segundo relatório da FIEMG “Proposta de Fomento à Produção de Gás Natural Renovável em Minas Gerais” (2022), o mercado de biogás e biometano pode, nos próximos anos, gerar 60 mil empregos diretos e indiretos, além de um aumento da massa salarial em torno de R\$1 bilhão. Por sua vez, a arrecadação de impostos líquidos pode chegar a R\$254 milhões, sendo R\$132 milhões somente com o ICMS. Ainda segundo o estudo da federação, investimentos na casa dos R\$7,7 bilhões para o mercado serão necessários para o seu desenvolvimento.

No que tange ao etanol e à biomassa, o estado mineiro é o segundo maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil, com 83,76 milhões de toneladas produzidas em 2024 (IBGE, 2025), sendo também um dos líderes na produção de etanol, com uma produção de 2,7 milhões de m³ ou 7,5% do total, em 2025 (ANP, 2025), mostrando o papel importante cumprido pelo estado no setor de biocombustíveis. Ainda nesse sentido, Minas possui amplo potencial a ser perseguido no setor de biomassa, ao ser um dos líderes em diversas de suas fontes, como café, cana-de-açúcar, milho e soja. Com isso, em fevereiro de 2025, Minas é o terceiro estado com maior potência outorgada na geração centralizada de energia a partir de biomassa, com 2,19 GW de capacidade distribuídos dentre 80 usinas.

Gráfico 8 - Geração de energia a partir de biomassa (em MW)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da Aneel (fev. 2025)

Portanto, a partir das energias renováveis esboçadas anteriormente, pode-se concluir que pelo lado da produção do H2BE, Minas possui certa vantagem devido à sua matriz elétrica, com ampla disponibilidade de energia limpa, barata e renovável, além de grande potencial ainda a ser preenchido e realizado.

2.2 Economia favorável ao hidrogênio

O estado conta com diversos setores econômicos aptos a consumir o H2BE. Assim, sua produção, sendo um produto de alta complexidade, pode atender toda a cadeia produtiva estadual com soluções inovadoras.

Em primeiro lugar, a indústria siderúrgica tem uma ampla demanda potencial em Minas Gerais de hidrogênio para produção de calor e como agente redutor na produção do aço. Minas Gerais, sendo o maior produtor de aço no país, de acordo com o relatório da PWC³, assume um papel de destaque dentro desse contexto ecológico. Historicamente, o Estado sempre teve os setores de mineração e siderurgia atuando como frentes de desenvolvimento socioeconômico em diferentes cidades e regiões mineiras, abrigando, assim, empresas como a [Aperam](#), a [ArcelorMittal](#), a [Gerdau](#), a [Usiminas](#), a [Vallourec](#), entre outras.

Em segundo lugar, a indústria de mineração almeja a adoção do H2BE como combustível para veículos fora de estrada e, conseqüentemente, como um dos caminhos para o seu avanço em uma direção mais sustentável e para sua redução da emissão de gases proveniente do diesel.

³ PRICEWATERHOUSECOOPERS (PwC). Siderurgia e Metalurgia no Brasil: 13ª edição. PwC Brasil, 2023.

Minas Gerais também é líder nacional neste setor, possuindo o maior número de empreendimentos minerários e respondendo por 22,8% do total de empregos formais gerados diretamente pela atividade extrativa mineral em 2020⁴. Portanto, a mineração é mais um setor da economia que estimula e visa o desenvolvimento da cadeia produtiva de H2BE no estado.

Ademais, segundo [ANM](#) (Anuário Mineral Brasileiro), Minas Gerais é o maior produtor de cimento do Brasil e, portanto, tem um forte incentivo para a transição para o hidrogênio da indústria de cimento também, a qual possui elevados índices de emissão de GEE e possui alta dificuldade para evoluir na sua descarbonização.

Enquanto o quarto maior estado do país em valor bruto da produção do setor agrícola em maio de 2023, Minas Gerais é uma peça central na produção agrícola brasileira, abastecendo tanto o mercado interno quanto o externo. Para sustentar essa cadeia, Minas é também um dos maiores importadores de fertilizantes do país, segundo a Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais (2021). Dito isso, a descarbonização da indústria de fertilizantes e agrícola passa pela adesão ao H2 e à amônia de baixo carbono, representando uma oportunidade para o estado.

Portanto, a posição estratégica de Minas Gerais favorece sua atuação em iniciativas inovadoras para solucionar desafios ambientais em setores como siderurgia, mineração, cimento e agropecuária, entre outros. O Capítulo 3, 'Setores Alvo', abordará em detalhe as especificidades de cada indústria demandante de H2BE.

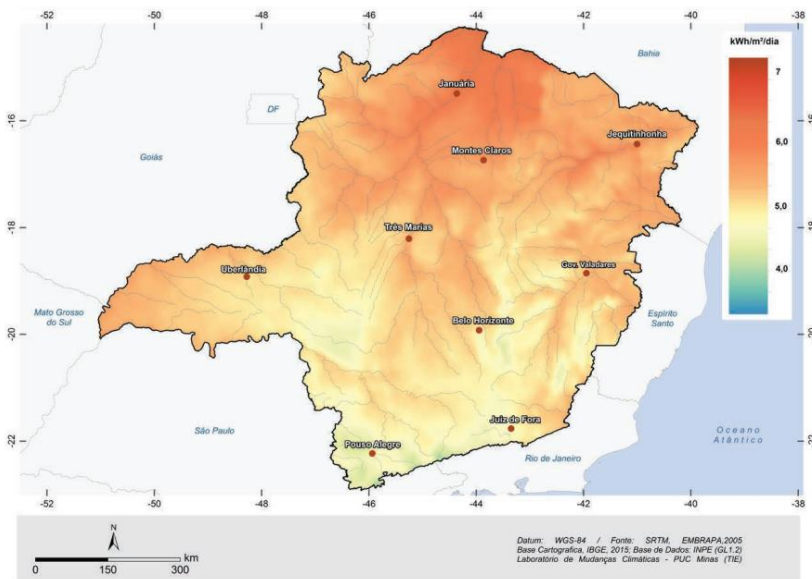
2.3 Posição privilegiada no país

A posição geográfica estratégica é mais um fator positivo para Minas. O estado possui condições climáticas propícias à irradiação solar e disponibilidade de correntes de ar.

O estado está localizado entre os paralelos 14°13'58'' e 22°54'00'' de latitude Sul e os meridianos 39°51'32'' e 51°02'35'' a Oeste de Greenwich, apresentando uma radiação solar que varia entre 4,5 e 6,5 kWh/m²/dia. Segundo o Atlas Solarimétrico de Minas Gerais (2016), a massa de ar tropical marítima que atua entre o Brasil e a África é o principal fator climático que inibe a formação de nuvens na região Norte de Minas Gerais, a qual apresenta maior índice de radiação no estado. A Figura 3 e a Tabela 4 ilustram as condições de irradiação de Minas Gerais.

⁴ De acordo com o Diagnóstico do Setor Mineral de Minas Gerais de 2022 desenvolvido pela Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais.

Figura 3 - Distribuição solar global diária média anual



Fonte: Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. Volume II.

Tabela 4 - EE e PR anuais para as 12 mesorregiões de MG estabelecidas pelo IBGE

Mesorregiões	Média Anual (kWh/kWp)	Média Anual - PR
Norte	1489	0,8
Noroeste	1469	0,8
Central de Minas	1407	0,8
Triângulo Mineiro	1400	0,8
Jequitinhonha	1364	0,79
Oeste	1341	0,79
Mucuri	1323	0,79
Metro BH	1322	0,79
Rio Doce	1309	0,8
Sul/Sudoeste	1287	0,79
Campo das Vertentes	1279	0,78
Zona da Mata	1258	0,79
Média Anual Estado MG	1354	0,79

Fonte: Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. Volume II.

Nota: Energia Específica (EE) e Rendimento Global do Sistema (PR).

Além disso, sua posição central no país proporciona a Minas Gerais proximidade estratégica com os principais mercados e centros populacionais do Brasil, como São Paulo, Rio de Janeiro, Bahia e o Distrito Federal, visto que, um raio de 800 km de Belo Horizonte compreende 64% do PIB brasileiro e 52% da população brasileira.

Tudo isso somado aos mercados industrial e agrícola estaduais, reafirmam o papel fundamental que a localização do estado desempenha. Além de atender a sua própria demanda industrial, o H2BE produzido no Brasil pode atender à demanda de outros grandes parques industriais vizinhos, como São Paulo e Rio de Janeiro. Do mesmo modo, o fertilizante verde produzido em MG pode atender a outros grandes mercados agrícolas brasileiros, como Mato Grosso, São Paulo e Goiás.

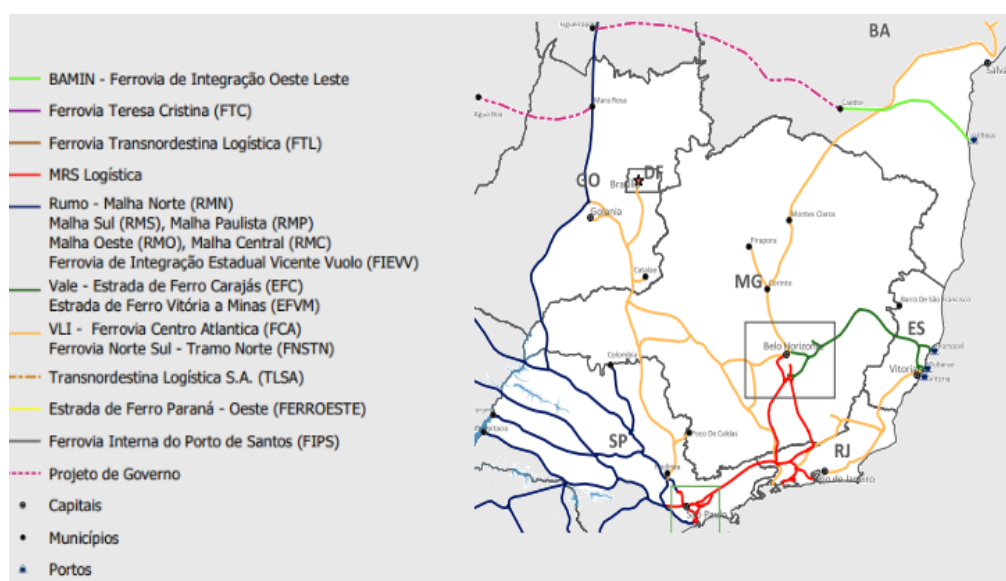
2.3.1. Malha ferroviária e rodoviária

Minas Gerais desempenha um papel fundamental na malha ferroviária brasileira, com mais de 31 mil km de ferrovias. A malha ferroviária conecta o Quadrilátero Ferrífero, no sul do estado, a outros centros importantes de mineração, siderurgia, pólos industriais e áreas agrícolas. O sistema ferroviário estende-se até os principais portos brasileiros, incluindo Santos (SP), Itaquí (MA), Vitória (ES) e Rio de Janeiro (RJ), facilitando o transporte eficiente de mercadorias (ANTF, 2024)

Essa extensa malha ferroviária desempenha um papel crucial na integração logística de Minas Gerais com os principais centros de produção e exportação do país. O Quadrilátero Ferrífero, em particular, é uma região estratégica para a mineração e siderurgia, sendo conectado de maneira eficiente aos portos de exportação por meio das ferrovias.

A Figura 4 apresenta o Mapa da Malha Ferroviária de Minas Gerais, destacando a extensão da rede ferroviária e sua interação com centros estratégicos no estado. Essa visualização proporciona uma compreensão mais clara do papel central das ferrovias na infraestrutura de transporte, conectando Minas Gerais aos principais polos de produção e exportação do Brasil.

Figura 4 - Mapa da Malha Ferroviária de Minas Gerais



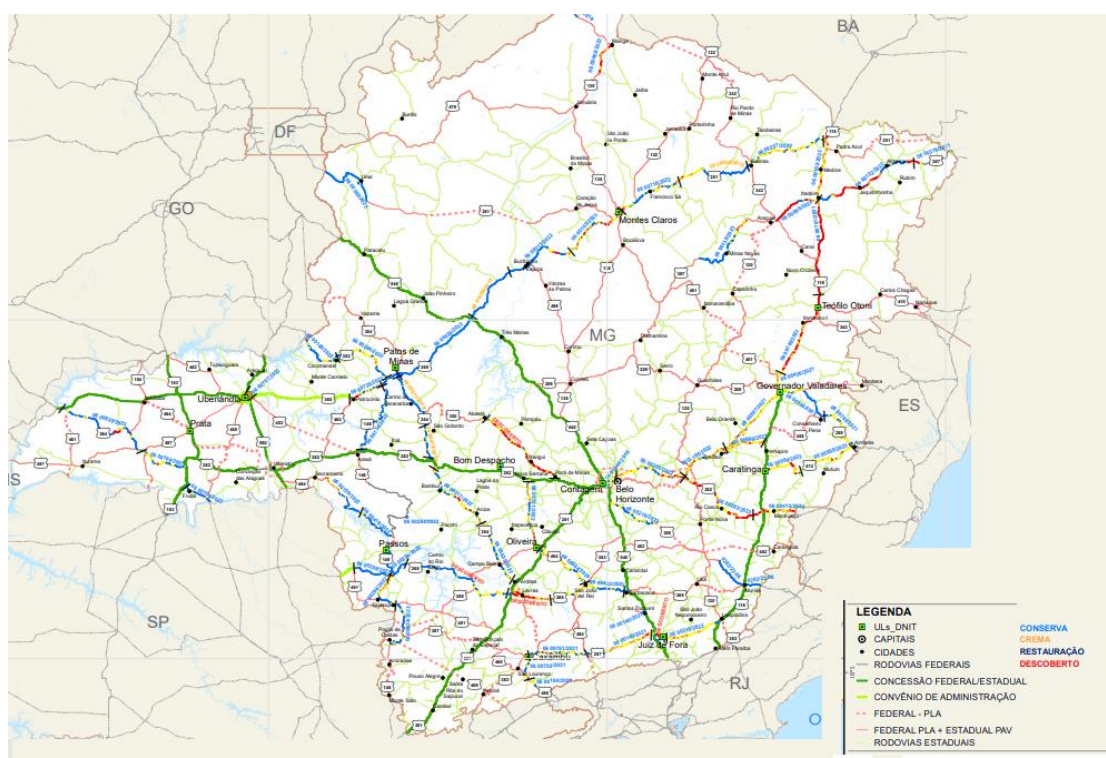
Fonte: ANTF, 2024.

Minas Gerais se destaca não apenas pela extensa malha ferroviária, mas também por possuir a maior malha rodoviária do Brasil. Com cerca de 16% do total de rodovias estaduais, federais e municipais do país, o estado apresenta uma rede viária abrangente que totaliza 272.062,90 km de extensão. Destes, 9.205 km são referentes às rodovias federais, 22.286 km são pavimentados e estaduais, enquanto uma expressiva extensão de 240.571,90 km é composta por rodovias municipais (MINAS GERAIS, 2024).

Essa malha rodoviária desempenha um papel crucial na conectividade de Minas Gerais com outros centros urbanos e mercados importantes. A capital, Belo Horizonte, está estrategicamente localizada no entroncamento de grandes rodovias, facilitando a integração com cidades-chave como Brasília, São Paulo, Rio de Janeiro e outras. As distâncias entre Belo Horizonte e essas capitais ilustram a importância estratégica das rodovias para a mobilidade no estado.

A Figura 5 apresenta o Mapa da Malha Rodoviária de Minas Gerais, destacando a extensão e a interconectividade das principais rodovias estaduais. Esse mapa oferece uma visão mais clara da abrangência da infraestrutura rodoviária que contribui significativamente para o desenvolvimento econômico e social de Minas Gerais.

Figura 5 - Mapa da Malha Rodoviária de Minas Gerais



Fonte: Adaptado do (DNIT, 2024)

Portanto, tanto a malha rodoviária quanto a ferroviária são elementos vitais na integração logística do estado, conectando suas riquezas e potencial econômico a diferentes regiões do

Brasil e aos principais portos para exportação. Essa infraestrutura robusta desempenha um papel estratégico no impulsionamento de setores-chave, como mineração, siderurgia, agricultura e indústria.

2.4 Universidades em destaque e centros de pesquisa de referência em desenvolvimento tecnológico e produção de conhecimento

Com 20 instituições de Ensino Superior Públicas e 3 das 10 melhores universidades do Brasil, Minas Gerais desponta no âmbito da educação no Brasil. Os cursos de graduação oferecidos por essas universidades, como Economia, Medicina, Biomedicina, Ciências Biológicas, Farmácia, Informática, Agronomia e Engenharia ocupam posições de destaque na classificação de ensino nacional.

Nesse sentido, além de abrigar o maior número de universidades federais no país, o estado está presente tanto em ranking nacionais, quanto internacionais. A [Universidade Federal de Minas Gerais \(UFMG\)](#), por exemplo, está em primeiro lugar dentre as universidades federais brasileiras e, ainda, ocupa a terceira posição no Brasil e a quarta na América Latina no Webometrics Ranking of World Universities (primeira edição de 2023).

Além disso, a [Universidade Federal de Itajubá \(UNIFEI\)](#) se destaca por ser pioneira no ensino de Engenharia Mecânica e Elétrica, sendo assim, considerada a primeira universidade tecnológica brasileira. Nesse sentido, a universidade inaugurou, em setembro de 2023, o [Centro de Hidrogênio Verde](#), um projeto em parceria com a Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ), o qual conta com uma planta de eletrólise e possui importante potencial no desenvolvimento de pesquisas e tecnologias no campo da produção e do uso de hidrogênio, bem como a expansão desse mercado e aplicação na indústria.

O escopo do projeto desenvolvido pela UNIFEI inclui, dentre outros, tópicos de conversão de energia; turbina a gás de H₂; balanceamento do sistema de energia; armazenamento de longo prazo, de curto prazo e intermitente; caminhões, trens e veículos fora de estrada; estações de H₂; rastreabilidade e certificação; aço verde; amônia e fertilizantes; rotas de geração de hidrogênio; biocombustíveis e etanol; e gaseificação de biomassa. Além disso, houve o desenvolvimento da calculadora de viabilidade econômica para aplicação do hidrogênio verde produzido a partir da energia fotovoltaica, que pode ser acessada neste [link](#). Tais tópicos estão alinhados com as diretrizes e metas do presente PEH2BE e com as oportunidades que Minas Gerais apresenta em termos da cadeia produtiva de H₂.

Outra referência no estado é a [Universidade Federal de Lavras \(UFLA\)](#), a qual está na vanguarda em diversos projetos de extensão: promoveu a Primeira Exposição Nacional do Milho e a Primeira Exposição Agropecuária de Minas Gerais, introduziu o primeiro silo aéreo para armazenagem de grãos no Estado e um dos primeiros tratores a arar terras brasileiras. Nesse contexto, a UFLA exerce com eficiência seu papel social no ensino, pesquisa, extensão e na prestação de serviços na área das Ciências Agrárias, que, por sua vez, é extremamente estratégica para Minas Gerais e para o Brasil e tem consonância com o desenvolvimento de

hidrogênio de baixa emissão, já que a indústria de fertilizantes e agrícola é um dos setores alvos com amplo potencial de demanda pelo vetor energético. Dito isso, a universidade também possui em execução projetos de P&D relativos ao hidrogênio.

O [CEFET \(Centro Federal de Educação Tecnológica\)](#), instituição destacada no estado com uma usina termossolar já construída, busca aplicar essa tecnologia na produção de hidrogênio. O foco é o hidrogênio turquesa, obtido pela decomposição térmica do gás natural como matéria-prima, num processo simples com potencial para produzir hidrogênio livre de CO₂. Outra opção é o uso de plantas heliotérmicas para gerar hidrogênio verde a partir de água do mar dessalinizada. A usina termossolar, capaz de gerar a temperatura necessária para a obtenção de hidrogênio via pirólise sem emissão de carbono, destaca-se como uma solução sustentável. Estas iniciativas desenvolvidas pelo CEFET evidenciam a capacidade de integrar fontes renováveis na produção de hidrogênio, e destaca a versatilidade da tecnologia termossolar, abrindo portas para soluções sustentáveis na geração de energia e na produção de combustíveis limpos. Este esforço alinha-se de forma exemplar com as tendências atuais de buscar alternativas inovadoras e sustentáveis no setor energético.

O [GREEN PUC Minas](#), grupo de estudos em energia da PUC Minas, é vinculado ao Instituto Politécnico e localizado no campus Coração Eucarístico. Fundado em 1997, seu propósito é impulsionar a inovação e o desenvolvimento de soluções para o uso de energias renováveis, garantindo qualidade e formação de mão de obra qualificada. Além de fomentar a adoção dessas fontes na sociedade, busca consolidar a PUC Minas como referência em sustentabilidade. Sua visão é tornar-se um dos principais grupos de estudo do Brasil, reconhecido internacionalmente pela integração entre ensino, pesquisa, desenvolvimento tecnológico e certificação de sistemas de energia renovável.

2.5 Avanços em relação ao H2BE no Brasil e em Minas Gerais

Em uma breve revisão do histórico brasileiro, tem-se o [Plano Nacional de Energia 2050](#) (PNE 2050), elaborado em 2020, no qual H₂ é destaque no capítulo de tecnologias disruptivas. Logo em seguida surge, em fevereiro de 2021, o CNPE (Conselho Nacional de Política Energética) que define o H₂ como uma das principais áreas a serem priorizadas no P&D regulado pela ANEEL e ANP. Já em março de 2021, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) lança o relatório [“Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira de Hidrogênio”](#) e, em abril de 2021, o CNPE determina a proposição de diretrizes para o [Programa Nacional do Hidrogênio](#). Por fim, o Brasil apresenta o Pacto Energético sobre Hidrogênio (compromisso voluntário) no âmbito do Diálogo em Alto Nível das Nações Unidas em junho de 2021.

O Hidrogênio de Baixa Emissão é uma das principais apostas da Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico (SEDE) para alavancar o potencial de geração e distribuição de energia no Estado de Minas Gerais nas próximas décadas.

Outro diferencial associado ao hidrogênio diz respeito à sua capacidade de armazenamento de quantidades excedentes de energias eólica e solar, o que evita o desperdício de energias limpas e possibilita uma maior regularidade no fornecimento.

Soma-se a esse leque de benefícios o fato de que o hidrogênio possui valor energético até três vezes maior que os combustíveis tradicionais e é um elemento bastante abundante no nosso planeta, o que, associado às diversas oportunidades de uso – que vão desde o segmento de transportes até a mineração e siderurgia – coloca o hidrogênio em posição de destaque para o desenvolvimento socioeconômico sustentável de Minas Gerais.

Em virtude do seu potencial de armazenamento, a expectativa é de que o hidrogênio verde (H2V) transforme o cenário global de energia, dada a abertura de um novo mercado internacional de comércio dessa fonte energética, de forma que países industrializados com elevado consumo de energia possam importar esse recurso de países cujas condições geográficas e climáticas sejam mais favoráveis para a produção de energia solar e eólica usadas no processo de eletrólise.

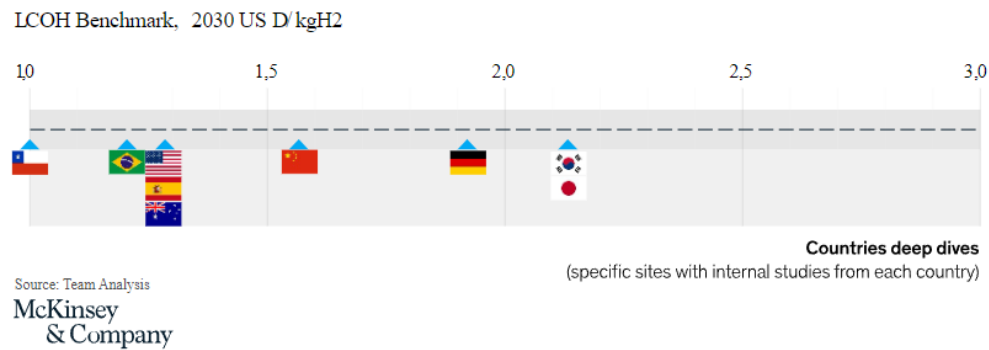
Nesse contexto global que vem sendo delineado para o futuro, a Alemanha ganha notoriedade como um dos países que vêm estabelecendo metas ambiciosas de descarbonização da economia até 2050, de modo que o país já tem despontado como um dos principais investidores do ramo, disposto a aplicar cerca de 9 bilhões de euros na pauta até 2030, dos quais 2 bilhões de euros serão investidos em países parceiros para fomentar a importação de hidrogênio. Além disso, outros países europeus têm planos muito semelhantes.

A Aliança Brasil-Alemanha para o Hidrogênio Verde é um grande passo para impulsionar o desenvolvimento do setor no Brasil. Ela pretende desenvolver uma cooperação estratégica ao criar um entendimento conjunto dos requisitos regulatórios e ao reunir as principais partes interessadas (governos, indústrias, universidades e organizações não governamentais), visando facilitar o desenvolvimento de projetos de alto alcance de H2V e promover a expansão do mercado em ambos países.

Nesse leque de países parceiros, o Brasil está posicionado de forma estratégica para fornecimento de H2V, não apenas pelas condições climáticas e geográficas excelentes e favoráveis para geração de energia limpa, mas sobretudo pela infraestrutura logística madura e pelas fortes relações econômicas com a Alemanha (o Brasil tem a maior base de empresas alemãs do mundo).

Levando em consideração a trajetória do H2 no Brasil e suas vantagens locais supracitadas, o país surge como um dos exportadores mais competitivos de H2V no mundo. Dito isso, é possível observar o “custo nivelado do hidrogênio”, da tradução de *Levelized Cost Of Hydrogen* - LCOH, por meio do Gráfico 9. Já a Tabela 5, demonstra como o Brasil está bem posicionado em relação aos outros países da América Latina quando se trata de desenvolver a potencialidade do hidrogênio.

Gráfico 9 - LCOH Benchmark, 2030 USD/kgH2



Fonte: McKinsey & Company, 2021

Tabela 5 - Potencial de hidrogênio na América Latina

Itens analisados em relação ao H2	Argentina	Brasil	Chile	Colômbia	Uruguai	Equador	Peru	Trindade e Tobago	Costa Rica	Paraguai
Marco regulatório	Não existe	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Não existe	Em progresso	Em progresso	Em progresso
Mercado interno e demanda	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe
Grandes centros industriais para uso de H ₂	Existe	Existe	Em progresso	Existe	Não existe	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso
Infraestrutura para transporte	Não existe	Em progresso	Em progresso	Não existe	Em progresso	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe
Excesso de energia verde para usar na eletrólise	Não existe	Em progresso	Existe	Não existe	Existe	Em progresso	Não existe	Não existe	Existe	Existe
Grande indústria de petróleo e gás para apoiar o hidrogênio azul	Existe	Existe	Não existe	Existe	Não existe	Em progresso	Em progresso	Existe	Não existe	Não existe
Habilidades da força de trabalho	Em progresso	Em progresso	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe	Em progresso	Em progresso	Não existe

Itens analisados em relação ao H2	Argentina	Brasil	Chile	Colômbia	Uruguai	Equador	Peru	Trindade e Tobago	Costa Rica	Paraguai
H2 azul ou cinza em produção	Existe	Existe	Existe	Em progresso	Existe	Não existe	Existe	Não existe	Não existe	Não existe
H2 verde em produção	Existe	Existe	Existe	Não existe	Em progresso	Não existe	Não existe	Não existe	Em progresso	Não existe
Apoio do governo	Em progresso	Existe	Existe	Em progresso	Existe	Em progresso	Em progresso	Existe	Existe	Existe

Fonte: Oliveira, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.38116/td2787>

Nesse cenário global, estratégias de H2BE estão sendo desenvolvidas em mais de 20 países, sendo 228 projetos divulgados pelo governo alemão, o que corresponde a um investimento de cerca de 80 bilhões de dólares. O aumento da demanda de Hidrogênio até 2050 corresponde a um potencial de até 9000 TWh de energia gerados.

No cenário nacional, tem-se a [Lei Federal 14.990](#), de 27 de setembro de 2024, que foi o marco legal que instituiu o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de

Carbono (PHBC), a fim de constituir fonte de recursos para a transição energética a partir do uso do hidrogênio de baixa emissão de carbono. Os objetivos do PHBC são focados em desenvolver o hidrogênio de baixa emissão de carbono e o hidrogênio renovável, dar suporte às ações em prol da transição energética, estabelecer metas objetivas para o desenvolvimento do mercado interno de hidrogênio de baixa emissão de carbono, aplicar incentivos para descarbonização com o uso de hidrogênio de baixa emissão de carbono nos setores industriais de difícil descarbonização, como o de fertilizantes, o siderúrgico, o cimenteiro, o químico e o petroquímico e promover o uso do hidrogênio de baixa emissão de carbono no transporte pesado.

No caso específico de Minas Gerais, que já é líder nacional na produção de energia solar e pioneiro nas pautas de diversificação sustentável da matriz elétrica e descarbonização da economia, a geração de hidrogênio de baixa emissão surge como solução viável e promissora diante das metas e compromissos pactuados no âmbito da Campanha “Race to Zero”. Somado a este fato, tem-se o marco regulatório findado através da promulgação da [Lei 24.940](#), de 27 de julho de 2024, que estabelece objetivos para a política estadual do hidrogênio de baixo carbono e do hidrogênio verde.

Em março de 2023, a empresa alemã Neuman & Esser anunciou o início da construção da primeira fábrica de geradores de hidrogênio verde da América do Sul, localizada em Belo Horizonte. O empreendimento possui investimentos previstos na casa dos R\$ 70 milhões, com uma geração de 75 empregos diretos e 200 indiretos.

Atualmente, para além da aliança firmada com a Alemanha, o Governo do Estado de Minas Gerais, por meio da SEDE, vem trabalhando para a construção de um plano estratégico para que empreendimentos ligados à geração de hidrogênio de baixa emissão possam prosperar no estado, de modo que a cadeia produtiva ligada a essa fonte energética possa se desenvolver – da mesma forma pioneira e inovadora como aconteceu com a energia solar.

Por ora, o planejamento estratégico da SEDE prevê a realização de um estudo comparativo em relação a iniciativas executadas em outros Estados, a realização de estudos sobre a oferta e demanda (existente e potencial) e a articulação com *players* do mercado para a definição de incentivos capazes de tornar Minas Gerais um estado atrativo para investimentos do setor.

O Ceará é um estado bastante adiantado quando se trata de hidrogênio de baixo carbono, tendo firmado parcerias com a UFC e federação das indústrias, adotado políticas de desburocratização e de incentivos fiscais. Como resultado, o Ceará atraiu recentemente um projeto da mineradora australiana Fortescue, que investirá 6 bilhões de dólares para produção de H2V no estado. O Ceará também atraiu mais 6,95 bilhões de investimento da empresa Qair Brasil para produzir H2V.

O governo de São Paulo desenvolveu o programa “Pró Veículo Verde” concedendo às montadoras o direito ao uso de até R\$500 milhões em crédito de ICMS para produção de veículos elétricos, a hidrogênio ou híbridos.

O avanço do programa de H2BE em Minas Gerais é fundamental para a transição energética, ampliando sua participação no cenário nacional. Atualmente, 90% do hidrogênio produzido no país não é considerado limpo, e o setor energético responde por dois terços das emissões de GEE (ABH2, 2022). Com a expansão do H2BE, prevê-se um crescimento nos setores privado, público e misto, além de uma redução de 10% nas emissões de GEE, sem contar os ganhos adicionais em setores de alta emissão, que serão beneficiados por maior eficiência e redução desses gases.

Um dos principais impactos dessa iniciativa é a expansão da oferta de hidrogênio, impulsionando a demanda para substituir combustíveis fósseis. Com políticas públicas bem estruturadas, esse movimento favorece o desenvolvimento regional em Minas Gerais. Além disso, o estado conta com poços de hidrogênio natural, de onde são extraídos H2 puro e argônio, reduzindo os custos de extração e fortalecendo Minas como um polo exportador de H2BE, ao mesmo tempo em que garante sua autossuficiência. Embora o foco principal seja o uso do hidrogênio na indústria local, a exportação permanece como uma alternativa estratégica. Atualmente, em Minas Gerais, somente a Refinaria Gabriel Passos (REGAP) possui liberação da ANP para produzir Hidrogênio, com uma demanda de 360.000Nm³/dia.

A demanda por Hidrogênio pode ainda impulsionar o fomento de outras formas de geração de energia limpa no estado, uma vez que a geração de H2V depende de fontes sustentáveis de energia para a efetivação da eletrólise, como, por exemplo, a solar fotovoltaica ou a hídrica. Outros setores também poderiam atuar ampliando a demanda por H2, como a mineração (processos de redução, extração e transporte), a siderurgia (na substituição do coque e do gás natural), a expansão do transporte ferroviário e a produção de insumos químicos. A [AngloAmerican](#), por exemplo, já apresentou estudos que evidenciam como o uso do H2V teria inúmeras utilizações dentro de Minas Gerais, principalmente no Quadrilátero Ferrífero. Já a [White Martins](#) (Linde) destaca que há capital disponível para investimentos em H2V no Brasil, contribuindo para uma produção eficiente de hidrogênio verde no país. Além disso, essa produção viabiliza a obtenção de amônia (NH₃), essencial para a fabricação de fertilizantes, um insumo estratégico com alto potencial de exportação para a Europa.

Ademais, outro ponto levantado pela empresa foi a utilização do H2V para o aumento da eficiência do etanol. Por sua vez, a Bloomberg (2021) apresentou que o custo do hidrogênio verde segue uma tendência decrescente: em 2021, o quilograma de LCOH₂ tem um custo de 12 dólares, com a estimativa para 2050 sendo de menos de 3 dólares por quilo. Assim, o H2V se tornará mais competitivo e poderá se tornar uma opção às demais formas de produção de H2 que geram altos índices de emissão a longo prazo, de forma que o mesmo ocorreria com o custo do eletrolisador - parte essencial para a transformação do H2. Por fim, a empresa também afirma que o Brasil pode chegar a ter a segunda produção de H2V mais barata no mundo, atrás apenas do Chile. Concluindo, a produção de H2V torna necessário a expansão da rede de gasodutos, ampliando a infraestrutura dentro do estado e o nível de emprego e renda.

2.5.1 Iniciativas da CEMIG

A empresa tem trabalhado com iniciativas para o desenvolvimento de projetos de H2V como integrador da transição energética em Minas Gerais. O programa de inovação, Inova Cemig, busca promover a inovação e o desenvolvimento tecnológico no setor de energia. O projeto visa desenvolver uma metodologia para o planejamento estratégico do H2V, além de criar um "roadmap" para a disseminação dessa tecnologia em vários setores produtivos em Minas Gerais. Esse plano estratégico servirá como guia para a implementação eficiente de tecnologias de H2V e a transformação do setor de energia no estado.

Além disso, a parceria estratégica com a Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ) para o projeto piloto de produção de H2V na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) representa um marco significativo. Com um investimento considerável nos próximos dois anos, o projeto fortalece a posição de Minas Gerais no cenário internacional do H2V. Nesse sentido, as iniciativas da CEMIG destacam o compromisso da empresa com a inovação, com o desenvolvimento tecnológico e colocam Minas Gerais na vanguarda da transição energética global.

Outrossim, o [Desafio CEMIG 2.0](#) é uma iniciativa estratégica que busca fomentar a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação no setor energético, com foco especial em soluções que elevem a cadeia de valor do hidrogênio verde. Por meio deste edital de chamada pública, a CEMIG pretende impulsionar a implementação de tecnologias sustentáveis, contribuindo para a transição energética e a descarbonização da matriz energética brasileira. Com um investimento previsto de R\$ 150 milhões, o Desafio 2.0 visa engajar empresas, instituições de pesquisa e startups na criação de soluções inovadoras que explorem o potencial do hidrogênio verde, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade e eficiência energética da companhia.

Ainda nesse sentido, a CEMIG possui o [Programa de Eficiência Energética \(PEE\)](#), que é uma iniciativa voltada para a pesquisa e implementação de soluções ligadas ao hidrogênio como uma alternativa sustentável no setor energético. Essa iniciativa visa desenvolver tecnologias inovadoras que permitam a produção, armazenamento e utilização do hidrogênio como vetor energético, colaborando para a descarbonização e aumentando a eficiência dos processos energéticos. Isso sendo possível com a articulação de parcerias com universidades, instituições de pesquisa e empresas para fomentar a inovação nesse campo, promovendo projetos piloto que alinhem sustentabilidade e viabilidade econômica, fundamentais para enfrentar os desafios atuais do setor elétrico e contribuir para a transição energética no Brasil.

As ações da CEMIG e sua parceria com a GIZ evidenciam o comprometimento do estado de Minas Gerais em liderar iniciativas inovadoras no setor de energia, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e para o crescimento econômico e a criação de novas oportunidades de emprego na região.

3. Setores Alvo

Minas Gerais tem enorme potencial para se tornar um verdadeiro hub do hidrogênio, podendo concentrar projetos de geração do H2BE, por ser um polo em geração de renováveis segundo a Aneel, principalmente hídrica, solar e biomassa; de aplicação, pois é uma potência nacional em indústrias que mais demandam essa fonte de energia, como a mineração, fertilizantes, siderurgia e automotivo; além de atrair projetos para produção de eletrolisadores e reformadores.

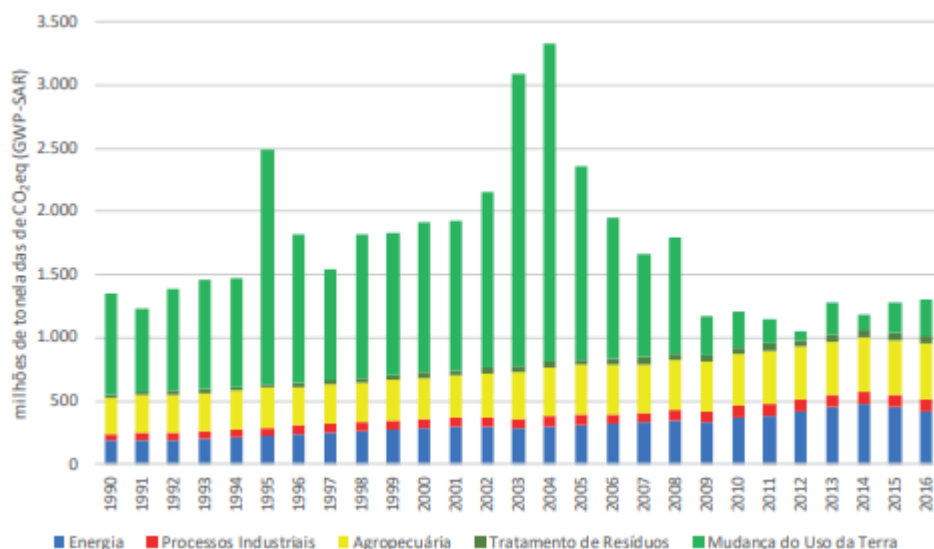
Minas é o maior estado produtor de energia solar fotovoltaica, com uma potência instalada de 7,22 GW em geração centralizada e 4,55 GW em geração distribuída, totalizando mais de 11 GW (Aneel, 2025). Por possuir uma rica bacia hidrográfica, o estado é um dos melhores locais para abrigar projetos de geração de energia hidráulica, principalmente PCHs e CGHs, consideradas fonte sustentável de geração de energia. Minas Gerais também é um dos maiores produtores de biomassa do país e possui a segunda maior potência instalada de geração elétrica nesta modalidade entre os estados brasileiros (Aneel, 2025).

Levando em consideração o potencial de produção de H2, pode-se enumerar os principais setores que irão demandar hidrogênio devido à busca pela descarbonização. Entre eles estão: a siderurgia, a mineração, a indústria de cimento, a indústria de fertilizantes e agrícola e, por fim, a indústria de transportes.

3.1 Indústria siderúrgica

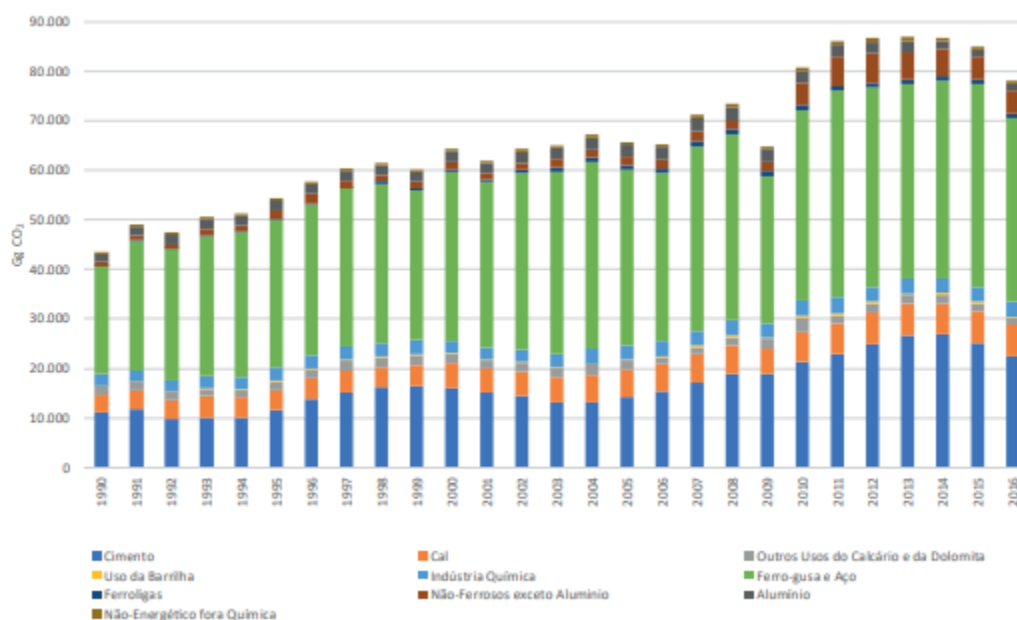
A indústria siderúrgica é um setor altamente intensivo em energia e emissões, sendo, assim, um dos setores mais poluentes e que enfrenta mais dificuldades no processo de descarbonização, devido à alta dependência de combustíveis fósseis. Segundo as [estimativas anuais de emissões de GEE no Brasil](#) elaboradas pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações em 2019, o setor de processos industriais emitiu 90.107 Gg CO₂eq em 2016, referente a 6,9% das emissões nacionais no mesmo ano (Gráfico 10). Nesse sentido, 48,2% das emissões em processos industriais nacionais são provenientes da siderurgia (Gráfico 11).

Gráfico 10 - Estimativas das emissões setoriais, em CO₂ eq (GWP 100 anos, SAR IPCC, 1995), de 1990 a 2016



Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2019.

Gráfico 11 - Emissões de CO₂ do setor Processos Industriais, de 1990 a 2016



Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2019.

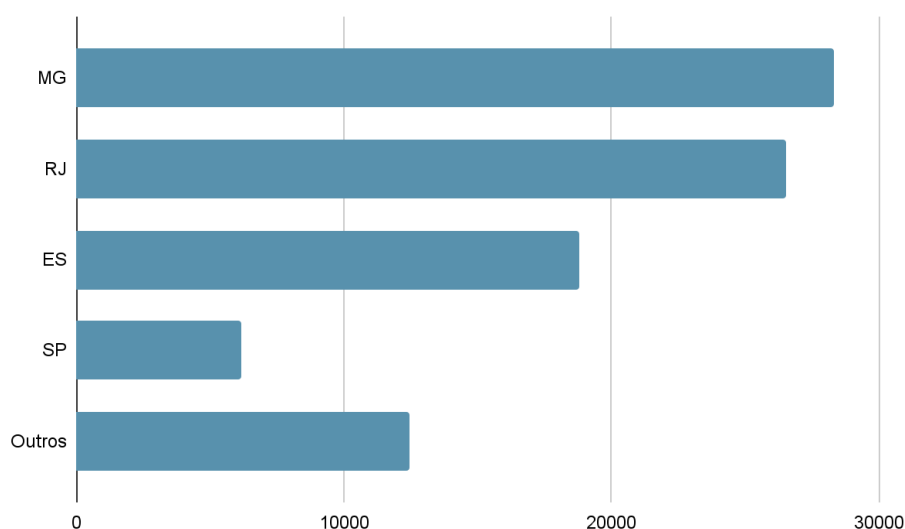
Logo, a descarbonização do setor passa necessariamente pela substituição de combustíveis e pela implementação de novos métodos de produção. Nesse contexto, a indústria siderúrgica representa um dos maiores potenciais do uso do Hidrogênio, tendo uma ampla demanda represada, no estado, do vetor energético para produção de calor e como agente redutor na produção do aço, substituindo o coque, o gás natural e/ou carvão e eliminando, assim, a emissão de CO₂ na atmosfera.

Segundo o [roadmap](#) produzido pelo Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), em 2022, a inserção direta de combustíveis alternativos, como o Hidrogênio, em altos-fornos surge como solução para a descarbonização. A produção se dá por meio da rota de DRI-EAF (*Direct reduction iron - Electric Arc Furnaces*)⁵ com 100% de hidrogênio em substituição ao gás natural na etapa de redução direta do ferro. Outra forma de reduzir as emissões na siderurgia está sendo desenvolvida pela [Boston Metals](#), na qual será aproveitada a eletrólise direta de óxido fundido, utilizando eletricidade para converter o minério de ferro em ferro líquido e oxigênio.

Enquanto o estado detentor do maior parque industrial siderúrgico do país, Minas Gerais é hoje líder no setor de siderurgia brasileiro, representando 30,7% da produção do país (Gráfico 12), sendo líder em suas três partes: ferro-gusa, aço bruto e laminados e semiacabados para vendas (Instituto Aço Brasil, 2022). Com o setor de siderurgia se tratando de um dos mais poluidores, a produção de aço verde por meio do H2BE será um elemento fundamental na descarbonização da economia mineira, com demanda crescente pelo produto.

Segundo o [Agora Industry](#) (2023)⁶, estudo realizado por uma think tank alemã, o segredo na redução das emissões líquidas a zero é o hidrogênio verde, uma vez que a indústria do aço pode se alinhar às metas globais de limitar o aquecimento do planeta ao substituir o carvão por hidrogênio verde. Nessa linha, Minas Gerais pode se tornar um protagonista no desenvolvimento de soluções para a produção e a aplicação de hidrogênio nas indústrias siderúrgicas, além do potencial de se converter em um grande fornecedor de commodities verdes.

Gráfico 12 - Produção somada de ferro-gusa, aço bruto, laminados e semiacabados em 2022



Fonte: Instituto Aço Brasil, 2022.

⁵ O ferro-esponja (*Direct Reduced Iron*) é reduzido em fornos elétricos a arco (*Electric Arc Furnaces*).

⁶ Disponível em: https://static.agora-energiemwende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021-06_IND_INT_GlobalSteel/A-EW_298_GlobalSteel_Insights_WEB.pdf. Acesso em: 09 ago. 2023

Mundialmente, esforços no sentido de adaptação a uma economia verde estão sendo mobilizados, e o setor da siderurgia já está em desenvolvimento em alguns dos países que estão entre os principais produtores de aço no mundo, conforme o mapa abaixo:

Figura 6 - Localização dos projetos anunciados



Fonte: Green Steel World Tracker, 2022

Dentre essas iniciativas, é relevante mencionar a mobilização da sul-coreana POSCO, uma das maiores empresas produtoras de aço no mundo, que está desenvolvendo um projeto, em parceria com a empresa britânica [Primetals Technologies](#). As empresas buscarão atingir a meta de neutralizar suas emissões de carbono até 2050, planejando iniciar uma produção de aço completamente baseada em H2BE até 2030. Com investimentos de até US\$14 bilhões, o exemplo POSCO reforça a tendência do mercado mundial de mitigar os impactos ambientais de sua produção de aço (Hosokawa e Ochiai, 2022).

3.2 Indústria de mineração

A indústria de mineração, por sua vez, enxerga como um dos caminhos para uma direção mais sustentável e para sua redução da emissão de gases proveniente do diesel, a adoção do H2BE como combustível para veículos fora de estrada ([Panorama do Hidrogênio no Brasil, 2022](#)).

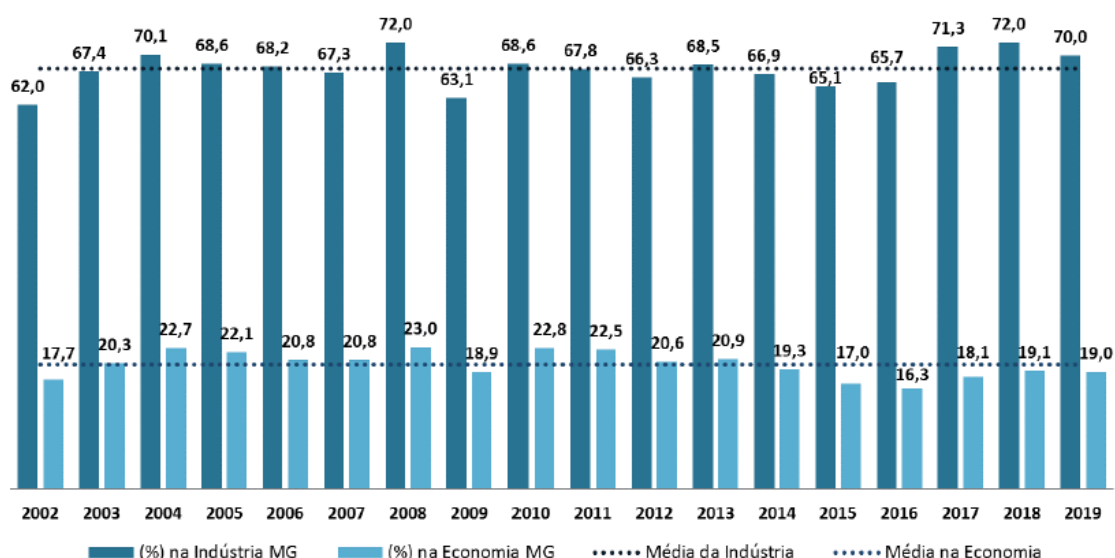
Ademais, outro impacto importante da mineração é a qualidade do minério de ferro, a qual é capaz de influenciar no aumento ou na diminuição da demanda energética do setor siderúrgico.

Ou seja, se a qualidade da matéria prima for maior, menor será a energia despendida pela siderurgia e menor serão as emissões do setor.

Nesse contexto, em 2022, a Anglo American divulgou a sua jornada para a neutralidade no Brasil que passa pela substituição de 100% do gás liquefeito de petróleo (GLP) por H2; a redução de 21,9 ktons/ano e CO₂; redução de aproximadamente 8 ktons/ano de GLP; substituição de 100% do óleo pesado nos fornos; redução de 80,7 ktons/ano e CO₂; redução de aproximadamente 25,8 ktons/ano de petróleo pesado e níquel verde. A empresa ainda juntou esforços para desenvolver e abastecer o maior caminhão de transporte de minas movido a hidrogênio do mundo (um caminhão de 220t com capacidade de carga de 290t = um peso total em carga de 510t), estima-se que tal substituição de combustível irá eliminar 80% das emissões de CO₂ provenientes de diesel nas áreas operacionais.

Dito isso, Minas Gerais mantém sua tradição na indústria extrativa mineral, contribuindo com 43,5% do total nacional do Valor da Produção Mineral (VPM) entre 2010 e 2020 (ANM, 2020). De acordo com o Diagnóstico do Setor Mineral de Minas Gerais de 2022 desenvolvido pela Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais e com os dados de 2019 do IBGE, as contribuições das indústrias extrativas e de transformação no Valor Adicionado (VA) é alta tanto para o total da indústria mineira, quanto para a economia do estado, com respectivas médias de 67,8% e 20,1% (Gráfico 13). Dessa forma, evidencia-se o alto nível de integração das cadeias produtivas de ambos setores analisados e seu importante papel na economia de Minas (SEDE, 2022).

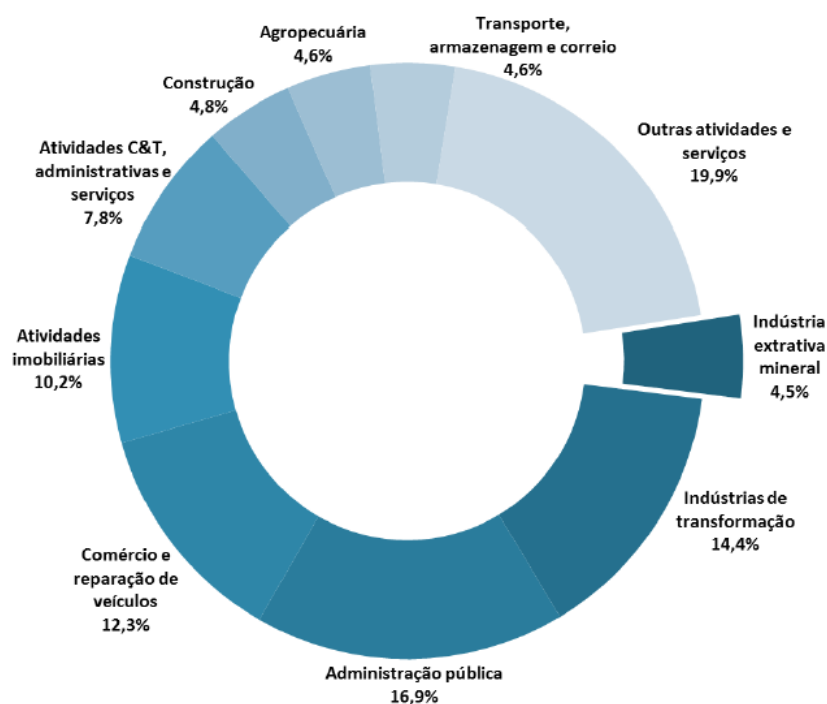
Gráfico 13 - Representatividade no VA das indústrias extrativas e de transformação na indústria e na economia de Minas Gerais



Fonte: IBGE, 2019

Para efeito de comparação com outras atividades econômicas de Minas Gerais, a indústria extrativa mineral corresponde a 4,5% do VA do estado em 2019 (Contas Regionais IBGE, 2019). A partir do Gráfico 14, pode-se notar que os setores mais representativos são outras atividades e serviços (19,9%), administração pública (16,9%) e indústria de transformação (14,4%).

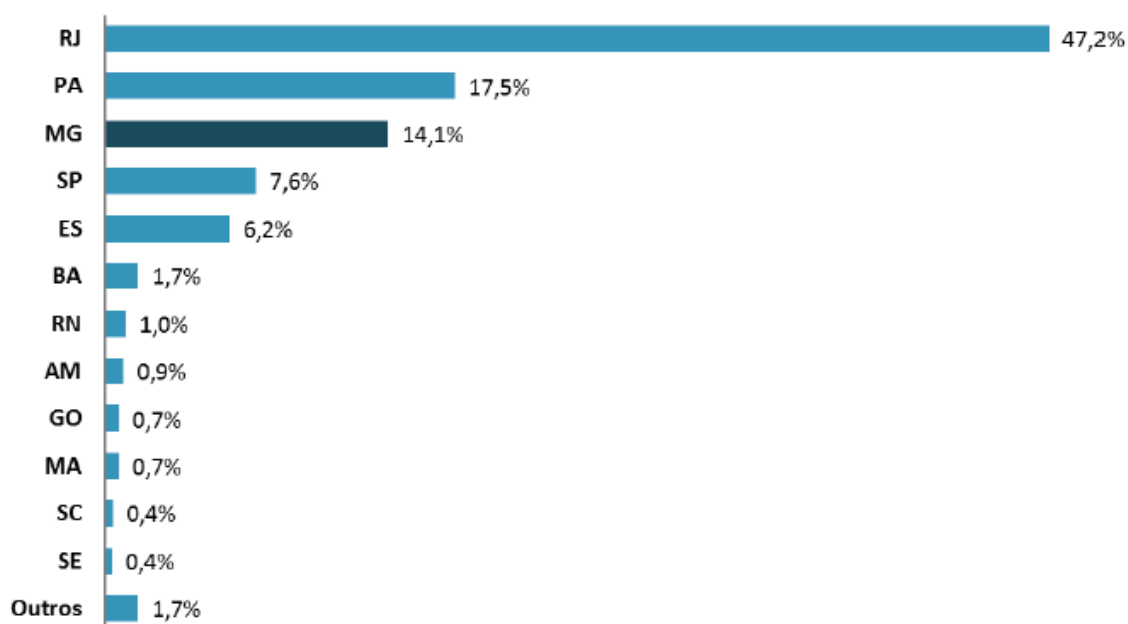
Gráfico 14 - Composição do VA do Estado de Minas Gerais por atividade econômica em 2019



Fonte: Contas Regionais IBGE, 2019

Quando comparado com outros estados, Minas Gerais é o terceiro estado mais relevante em termos de participação no VA da indústria extrativa mineral em 2019. O estado está atrás somente do Rio de Janeiro, devido à extração de petróleo e do Pará, em consequência da crescente exploração de minério de ferro (IBGE, 2019). O Gráfico 15 explana esse ranking.

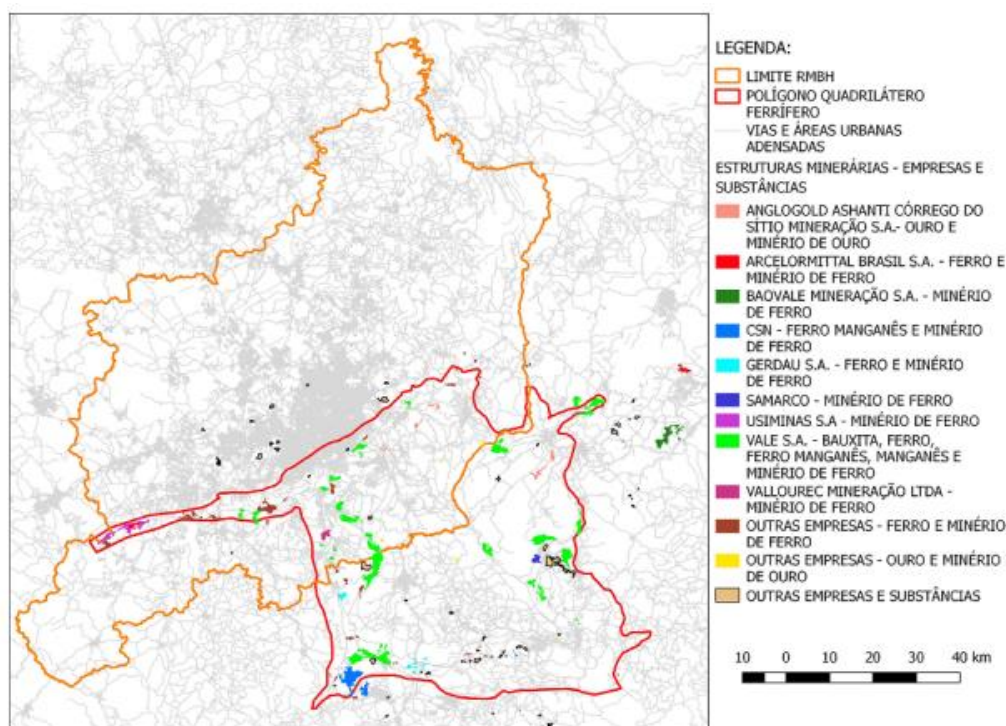
Gráfico 15 - Participação das unidades da federação no VA da Indústria Extrativa Mineral



Fonte: IBGE, 2019

Por fim, a Figura 7 ilustra as estruturas minerárias do quadrilátero ferrífero e da RMBH, demonstrando o tamanho da oportunidade de investir na descarbonização da indústria minerária para Minas e, especialmente, para o quadrilátero ferrífero, localizado no centro-sul do estado.

Figura 7 - Potencial de uso do hidrogênio de baixa emissão na mineração



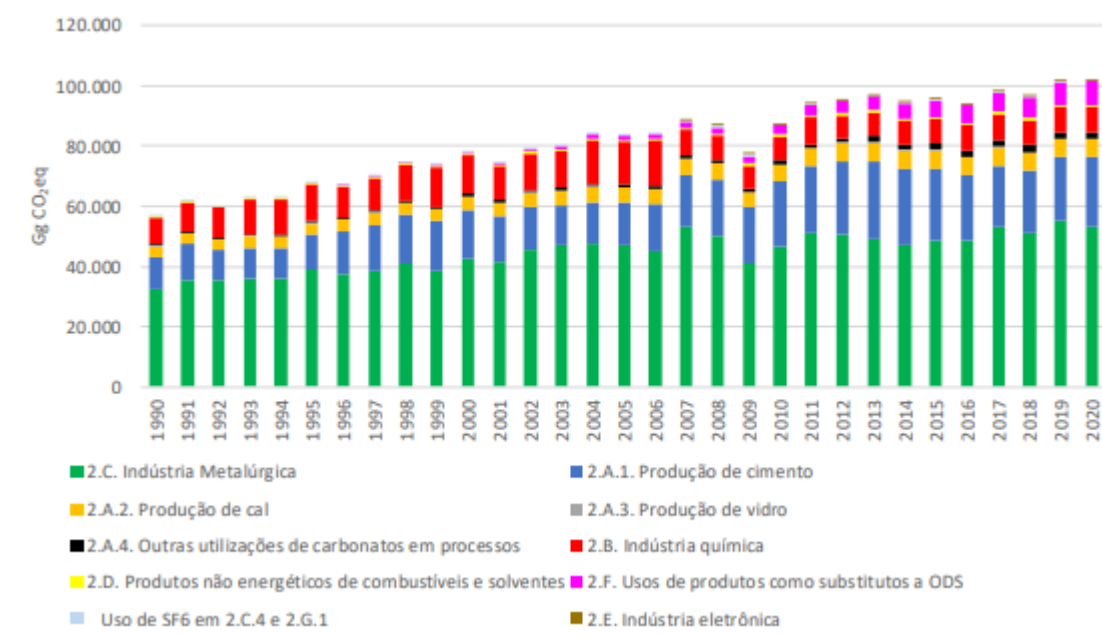
Fonte: Souza, 2021

3.3 Indústria de cimento

Em relação à indústria de cimento, Minas é o maior produtor do Brasil, segundo dados de 2022 do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). Somente neste ano, Minas foi responsável por 23,55% da produção nacional, mais que a produção das regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sul (SNIC, 2022). Portanto, o estado tem um forte incentivo para a transição para o hidrogênio nesta indústria intensiva em emissões.

A indústria de cimento é uma das maiores emissoras de GEE. O Gráfico 11 demonstra que 24,9% das emissões em processos industriais em 2016 são provenientes do processo produtivo do cimento. Já em 2020, a produção de cimento representou 22,7% das emissões (Gráfico 16), sendo o segundo subsetor que mais emitiu no ano, atrás somente da indústria metalúrgica que representa 52,1% das emissões.

Gráfico 16 - Emissões do setor IPPU (2), de 1990 a 2020, em CO₂eq.



Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2020

Combustíveis fósseis são utilizados para gerar energia térmica para os fornos de cimento, resultando um importante composto chamado clínquer. Portanto, pode-se dizer que o principal composto do cimento, o clínquer, é também o maior responsável pelas emissões de GEE e colabora para o difícil abatimento das emissões desta indústria.

Por fim, medidas de redução do uso de clínquer e de combustíveis fósseis são centrais na busca pela descarbonização da indústria de cimento e estão previstas no PLAC-MG (Meta 3.1 e 3.2 da Indústria). Como Minas Gerais é o principal produtor nacional, o potencial de demanda neste setor também é extremamente alto.

3.4 Indústria de fertilizantes e agrícola

Por fim, enquanto o quarto maior estado do país em valor bruto da produção do setor agrícola em maio de 2023, com R\$ 129,89 bilhões, de acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), Minas Gerais é uma peça central na produção agrícola brasileira, abastecendo tanto o mercado interno quanto o externo. Para sustentar essa cadeia, Minas é também um dos maiores importadores de fertilizantes do país, com 3,87 milhões de toneladas importadas em 2021 por US\$1,5 bilhão, segundo a Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais (SEAPA). A Tabela 6 representa a produção agrícola de Minas Gerais em 2023:

Tabela 6 - Produção agrícola de Minas Gerais em 2023

Ranking	Produto	Produção	Participação MG/BR
1º	Cafê	23,3 milhões de sacas	44,0%
1º	Batata-inglesa	1,4 milhões de toneladas	33,1%
1º	Alho	93,2 mil toneladas	50,4%
1º	Marmelo	0,37 mil toneladas	76,7%
2º	Cana-de-açúcar	82,5 milhões de toneladas	10,5%
2º	Abacate	1222,3 mil toneladas	29,0%
2º	Feijão	578,8 mil toneladas	20,0%

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais, 2025

Por um lado, a importação de fertilizantes intensifica a dependência das oscilações de preços no mercado internacional, impactando negativamente o balanço comercial de produtos químicos. Por outro lado, o H2V, gerado próximo ao local de consumo (como é proposto no Hub mineiro de H2BE), pode contribuir significativamente para reduzir a dependência das importações de fertilizantes e o déficit da balança comercial de produtos químicos, já que a produção do H2V permite a produção de amônia, a qual é matéria prima para fertilizantes.

A amônia, utilizada como fertilizante no agronegócio, pode ser convertida em hidrogênio, pois a estrutura molecular da amônia é rica em átomos de hidrogênio. Portanto, a descarbonização da indústria de fertilizantes e agrícola passa pela adesão ao H2 e à amônia de baixo carbono, representando uma oportunidade para o estado, um dos maiores produtores agrícolas do país.

3.5 Indústria de transportes

O Relatório do SEEG (2024) indica que o setor de transportes brasileiro emitiu cerca de 200 milhões de toneladas de CO2 na atmosfera, em razão da utilização de combustíveis fósseis no ano de 2018, representando 49% das emissões do setor de energia no país. No Brasil, a proporção de emissões de GEE provenientes do setor de transportes é alta se comparada com a média mundial. Entre 1990 e 2014, as emissões de CO2 provenientes da combustão de combustíveis fósseis aumentaram em 158%, enquanto a média de países americanos não membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) foi de 112% (FGV ENERGIA, 2022).

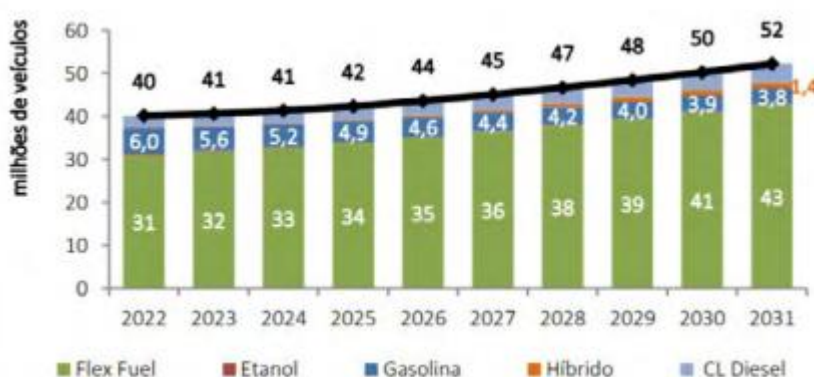
Em 2020, conforme os dados do balanço energético realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 398,3 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO2 -eq), sendo a maior parte (178,8 Mt CO2 -eq) gerada no setor de transportes, ou seja, corresponde a cerca de 45% da emissão final (FGV ENERGIA, 2022).

O estudo da FGV (2022) destaca a forte conexão do setor de energia com os setores industrial e de transporte, tanto por oferecer alternativas para a redução de emissões de carbono quanto por atuar como um vetor energético, incluindo a possibilidade de armazenamento de energia.

O uso do hidrogênio favorece um salto tecnológico que favorece a eletrificação ou uso próprio das células de combustíveis, atingindo grande parcela dos veículos brasileiros, desde os veículos leves utilitários até os veículos pesados para uso industrial/extrativo.

Ainda foi apresentado que os veículos leves possui alta relevância como meio de transporte no Brasil, de forma que estes demonstram uma evolução crescente ao longo dos próximos anos, como será demonstrado no gráfico abaixo:

Gráfico 17 - Projeção da Frota de Veículos Leves 2022-2031



Fonte: FGV ENERGIA, 2022

Com essa informação, o mercado potencial para o uso de hidrogênio como combustível se apresenta como uma oportunidade a ser explorada. Neste caso, o hidrogênio poderia ser utilizado para abastecimento de veículos elétricos que operem com célula de combustível ou ser utilizado em motores de combustão interna ciclo Otto adaptado em substituição a gasolina e/ou gás natural. Essa medida é importante, pois os motores elétricos atuais têm mais de 90% de eficiência enquanto os motores a combustão não passam de 40% (FGV ENERGIA, 2022).

Quanto a infraestrutura para os veículos de transporte de carga e de atividade industrial/extrativa, representando os veículos pesados, deve ser desenvolvida, uma vez que esses veículos ficam restritos a pequenos círculos produtivos ou pela necessidade de cruzar longas distâncias pelas rodovias brasileiras. Esse fato encarece o produto final, seja em questão de frete ou movimentação de insumos, além de ser o modal mais utilizado no Brasil (54,5% das movimentações) (FGV ENERGIA, 2022).

Dessa forma, o desenvolvimento de novas tecnologias se torna essencial para mitigar os problemas do principal modal de transportes do Brasil. Em conversa com empresas do setor, a tecnologia para veículos pesados ainda se encontra incipiente e mais voltada para o mercado

consumidor de utilitários, de forma que o desenvolvimento dessa área será capaz de atrair novos investimentos e, conseqüentemente, empregos e renda.

Nesse sentido, alguns projetos já começaram a se materializar no Brasil, visto que dois novos empreendimentos foram firmados para acontecer no Estado de São Paulo devido a sua economia dinâmica e conexão dos setores produtivos. A Great Wall Motors (GWM) fechou um acordo com o Governo de São Paulo para criar frota de veículos a hidrogênio, com investimentos que podem chegar a R\$ 10 bilhões e a Toyota, em parceria com a USP, anunciou a primeira estação de hidrogênio do mundo a partir do etanol, com investimentos chegando a R\$ 50 milhões de reais.

3.6 Articulações Estratégicas para a Produção e Consumo de Hidrogênio em Minas Gerais

Minas Gerais, reconhecida por seu vasto potencial em recursos energéticos, está em posição privilegiada para se consolidar como um hub destacado na produção e consumo de hidrogênio. A sinergia entre as indústrias siderúrgica, de mineração, de cimento e agrícola é vital para estabelecer uma cadeia eficiente e sustentável. Na Tabela 7, são apresentadas as principais articulações estratégicas por setor.

Além das estratégias específicas de cada setor, medidas gerais de articulação são fundamentais. A criação de uma infraestrutura compartilhada para produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio é essencial. Incentivos governamentais, como benefícios fiscais e subsídios, são peças-chave para impulsionar investimentos e financiamentos. A pesquisa e o desenvolvimento devem ser priorizados, com a criação de centros de inovação que fomentem a colaboração entre academia, indústria e governo. A capacitação de mão de obra especializada é uma necessidade urgente, demandando programas educacionais específicos e parcerias institucionais.

A troca contínua de experiências por meio do benchmarking internacional é uma ferramenta de aprendizado constante, aproveitando o sucesso de regiões que já implementaram tecnologias de hidrogênio. Uma comunicação eficaz sobre os benefícios ambientais, econômicos e sociais da transição para o hidrogênio é crucial. Consolidar Minas Gerais como um pólo referência na produção de hidrogênio exige uma abordagem integrada, envolvendo indústrias, governo e a comunidade, para construir uma narrativa sustentável de impacto para todos os setores e indústria.

Tabela 7 - Estratégias de articulação com as indústrias

Setor	Potencial de Consumo de Hidrogênio	Estratégias de Articulação
Siderurgia	Ampla demanda potencial na produção de aço por meio de hidrogênio de baixa emissão.	Integração direta de combustíveis alternativos, como hidrogênio, em altos-fornos. Pesquisa e desenvolvimento em tecnologias para redução de emissões.
Mineração	Adoção do H2BE como combustível para veículos fora de estrada e redução de emissões associadas.	Substituição de 100% do GLP por H2, desenvolvimento de caminhões movidos a hidrogênio.
Indústria de Cimento	Maior produtor nacional de cimento, representando uma oportunidade significativa para o uso de hidrogênio.	Redução do uso de clínquer e combustíveis fósseis, investimento em tecnologias de baixo carbono.
Agrícola	Grande importador de fertilizantes, dependente de variações de preços internacionais.	Produção local de hidrogênio para a fabricação de amônia, reduzindo a dependência de importações.

Fonte: Elaboração própria, 2025

4. Estudo do ambiente regulatório

Como o hidrogênio é um combustível obtido por meio da eletrólise, processo químico em que uma corrente elétrica separa o hidrogênio do oxigênio que existe na água, um dos pontos fortes do Brasil é justamente a matriz renovável, de modo que o país pode se tornar exportador do combustível em alguns anos. Para isso, é preciso superar desafios tecnológicos e regulatórios.

De acordo com o [Plano Decenal de Expansão de Energia \(PDE 2031\)](#), elaborado pela EPE, o Brasil reúne condições para produzir H2V mais barato que a média internacional. O custo estimado do H2V – uma vez que ainda não há produção efetiva – está entre US\$2,2 e US\$5,2 por quilo no país.

Em dezembro de 2020, o PNE 2050 já delineou as diretrizes para a estratégia de longo prazo do setor energético brasileiro. O PNE 2050 listou o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva, capaz de mudar significativamente o mercado de energia. O PNE 2050 destaca que o hidrogênio pode ajudar a resolver desafios energéticos, como a redução das emissões de carbono em setores de difícil descarbonização, o armazenamento de energias renováveis, a segurança no fornecimento de energia devido à flexibilidade na produção de hidrogênio (múltiplas fontes) e diversidade na sua aplicação e usos (direto ou convertido em eletricidade). O PNE 2050 também listou células de combustível como uma potencial tecnologia chave para a descarbonização do setor de transporte no Brasil.

Outro tema interessante abordado pelo PNE 2050 é a ligação entre o hidrogênio e o gás natural. Com a sanção da nova lei do gás em abril de 2021 ([Lei Nº 14.134](#)), a regulação setorial do novo mercado de gás pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) é iminente. Esse contexto legal e regulatório, somado ao Termo de Compromisso de Cessação de Prática entre a Petrobrás e o Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE), abre espaço para novos players privados no setor.

Neste contexto, o PNE 2050 sugere que o arcabouço regulatório para o armazenamento de hidrogênio seja abordado no contexto da regulação do Novo Mercado de Gás. Além disso, o documento sugere que uma regulação técnica seja implantada para regular a mistura de hidrogênio com o gás na malha de gás natural. Sujeito a potenciais ajustes específicos na infraestrutura, essa mistura poderia permitir o transporte de hidrogênio usando a infraestrutura de gasodutos existentes, reduzindo custos.

O PNE 2050 reconhece que a regulação da indústria do hidrogênio será relevante para enfrentar alguns desafios, incluindo os aspectos de segurança, dada a alta inflamabilidade do hidrogênio. Portanto, a primeira recomendação do PNE 2050 é que sejam feitos estudos adicionais por parte do governo para mapear os obstáculos relacionados à infraestrutura para o transporte, armazenamento e fornecimento, para determinar as melhorias regulatórias necessárias para uma regulação eficiente do hidrogênio.

Em fevereiro de 2021, a EPE publicou uma nota técnica intitulada “[Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio](#)”. A nota técnica apresenta as ações necessárias para a difusão do hidrogênio na matriz energética brasileira. A nota também defende a adoção da

“estratégia arco-íris”, na qual todas as “cores” do hidrogênio importam e o Brasil deve olhar para todas elas para garantir a posição estratégica no mercado de hidrogênio. Isto inclui, mas não é limitado, ao Hidrogênio Verde, que atualmente mostra-se menos competitivo em termos de custos, mas espera-se que desempenhe um papel chave na transição energética no futuro próximo. Assim, o PNE 2050 destaca que o desenvolvimento de um arcabouço regulatório, legal e institucional eficaz para o hidrogênio é essencial para dar segurança à indústria e aos consumidores.

Dito isso, o diagnóstico do ambiente regulatório atual passa pelo mapeamento das competências existentes, e das novas necessidades; pelos códigos, normas padrões, certificações expedidas pelas instituições nacionais em consonância com regras internacionais; pela regulação aberta às condições de mercado e evitando barreiras e trancamentos tecnológicos; e pelo estímulo e facilitação de parcerias industriais e produtivas na cadeia de hidrogênio, com foco tanto na atração de investimentos, quanto na inserção em cadeias de valor globais.

No âmbito federal, há a [Lei Federal nº 14.948](#), instituída em 2 de agosto de 2024, que formaliza o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, estabelecendo uma Política Nacional que visa, entre outros objetivos, a inserção competitiva do hidrogênio na matriz energética brasileira. Essa iniciativa é acompanhada pela criação de incentivos para a indústria, como o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro) e o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). A lei busca fomentar a pesquisa e o desenvolvimento, promover o uso sustentável do hidrogênio e garantir a segurança alimentar, contribuindo para a descarbonização da economia e o cumprimento das metas de mitigação das mudanças climáticas.

Em complemento à Lei Federal supracitada, foi sancionada, em 27 de setembro de 2024, a [Lei Federal 14.990](#), a qual institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC) para fomentar a transição energética por meio do uso do hidrogênio de baixa emissão. O programa prevê incentivos fiscais, concedendo créditos de até 100% da diferença de preço entre o hidrogênio de baixa emissão e seus substitutos. A lei também altera a Lei nº 14.948/2024, atribuindo a um órgão federal a responsabilidade de definir parâmetros técnicos e um plano de trabalho para a política nacional de hidrogênio, com monitoramento e publicação anual de resultados.

Além disso, Minas Gerais também avança na implementação de políticas para o desenvolvimento do hidrogênio. A [Lei Estadual nº 24.940](#), de 26 de julho de 2024, estabelece a política estadual de Minas Gerais para o hidrogênio de baixo carbono e hidrogênio verde, com o objetivo de integrar essas fontes energéticas à matriz energética do estado de maneira sustentável. A lei busca incentivar o uso do hidrogênio de baixa emissão, promovendo sua utilização em diversas aplicações, como fonte energética e produção de fertilizantes agrícolas, com foco na redução das emissões de gases de efeito estufa e no enfrentamento das mudanças climáticas. Além disso, a legislação fomenta a cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono, oferecendo incentivos fiscais e creditícios, apoio à inovação tecnológica e atração de investimentos para a infraestrutura necessária, além de estimular o desenvolvimento de

capacitação nos setores produtivos relacionados. O estado também se compromete a realizar estudos para aumentar a participação do hidrogênio na matriz energética e adotar medidas de incentivo, particularmente no transporte público e na agricultura. Por fim, está em vias de ser publicado um Decreto Estadual que regulamenta a Política Estadual do Hidrogênio de Baixo Carbono e do Hidrogênio Verde, instituída pela Lei Estadual nº 24.940/2024.

5. Papel da PD&I

Além do ambiente regulatório, outro importante motor para a implementação de novas tecnologias é a criação de incentivos para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I). Nesse sentido, em fevereiro de 2021, o CNPE aprovou a resolução para orientar que a ANP e a ANEEL priorizem a destinação de recursos de PD&I para o setor de hidrogênio.

No Brasil, tanto as empresas de petróleo quanto as de energia elétrica são obrigadas a investir em projetos no setor de energia. A resolução do CNPE é um impulso para direcionar tais investimentos para as áreas consideradas como prioridade em termos de transição energética, o que inclui o hidrogênio.

Para estimular o PD&I no campo do H2BE, diversos programas do Governo de Minas Gerais estão disponíveis. Primeiramente, o [Compete Minas](#), por meio das chamadas públicas intituladas como: “Linha Tríplice hélice”, “Linha Empresas, Startups e Cooperativas” e “Pesquisador na Empresa”, tem como objetivo aumentar a competitividade e promover a inovação nas empresas do estado, contando com mais de 100 milhões de reais investidos em ciência e inovação no setor produtivo. Além dele, o [Seed MG](#) é um programa de aceleração de startups para empreendedores do mundo todo que queiram desenvolver seus negócios em Minas Gerais, sendo a primeira aceleradora financiada apenas por recursos públicos no Brasil.

Outras iniciativas incluem o [Simi](#) (Sistema Mineiro de Inovação), que busca gerar convergência entre governo, empresas, instituições de ensino superior e startups para potencializar a inovação em Minas e o [Vuei](#) (Vivência Universitária em Empreendedorismo e Inovação), que trabalha na aproximação entre as Instituições de Ensino Superior mineiras e o mercado, incentivando o desenvolvimento da capacidade empreendedora em alunos e professores.

Está disponível ainda o HubMG, que tem como objetivo fomentar a cultura empreendedora, oferecendo suporte para que as startups possam desenvolver suas ideias, validar seus modelos de negócio e escalá-los de forma sustentável. O programa é dividido em HubMG Gov, com foco na modernização dos serviços públicos, e em HubMG MPE, voltado para o apoio às micro e pequenas empresas do estado. Ademais, o Governo de Minas Gerais através da SEDE tem como iniciativa para impulsionar a inovação nas empresas mineiras, o Programa Pró-Inovação, que é executado diretamente pelo BDMG em conjunto com a Fapemig, e disponibiliza crédito para o financiamento de projetos de inovação nas empresas, aumentando a sua competitividade.

O Programa Pró-Inovação figura como uma das principais opções de financiamento para o desenvolvimento da cadeia do H2 de baixo carbono, pois disponibiliza créditos na ordem de R\$ 150 milhões para financiar até 80% do valor de projetos que contenham iniciativas de inovação e tecnologia em produtos, processos e/ou serviços ainda não desenvolvidos em Minas Gerais. Tal opção de financiamento possui elevado potencial de impulsionar o desenvolvimento de tecnologias como eletrolisadores e reformadores que ampliem iniciativas e reduzam os custos de produção e transporte de larga escala de H2BE em Minas Gerais.

Para o desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio, que envolve a aquisição e comercialização de máquinas e equipamentos para a conversão de biomassa em produtos energéticos ou de alto valor agregado, como o próprio hidrogênio, o BNDES, em parceria com o BDMG, disponibiliza a linha de crédito [FINAME - Fundo Clima](#). Essa iniciativa representa uma alternativa para impulsionar tecnologias voltadas à produção e elaboração do hidrogênio de baixo carbono. Além disso, os programas [BDMG - Mais Inovação](#) e [BDMG - Sustentabilidade Clima](#) permitem o financiamento de projetos de energia renovável, serviços tecnológicos voltados à otimização da produção, além de viabilizar a aquisição de máquinas, equipamentos e componentes essenciais à cadeia produtiva do hidrogênio verde.

Além dos programas e financiamentos para inovação do Governo de Minas Gerais citados anteriormente, a Cemig também possui iniciativas de P&D para superação de desafios no setor elétrico, que são ferramentas para a expansão da cadeia do H2BE. Especificamente, a Cemig conta com edital de chamada pública “Desafio PDI 2.0” para seleção de projetos de PD&I que busquem a descarbonização e eletrificação da economia com a inclusão da eletromobilidade e da cadeia de valor do hidrogênio. Tal edital destina R\$ 150 milhões para projetos inovadores, e faz parte do programa de PD&I da Aneel.

A Fapemig também é um importante ator na promoção do desenvolvimento tecnológico da cadeia do hidrogênio em Minas Gerais. No ano de 2023, a instituição realizou o lançamento de duas chamadas públicas⁷ para apoiar o desenvolvimento científico, tecnológico e inovativo para a economia mineira que possuem como um dos eixos prioritários o hidrogênio como fonte de energia. Por fim, outros projetos incluem chamadas de incremento da maturidade tecnológica, de modo a apoiar o desenvolvimento tecnológico e o amadurecimento dos níveis de prontidão em inovação de tecnologias, possibilitando, dentre outros, a transformação e geração de novos produtos, ações de fortalecimento dos Parques Tecnológicos, essenciais para integrar o setor produtivo ao sistema de tríplice hélice, atrair empreendimentos de base tecnológica e gerar empregos e renda qualificadas e, enfim, chamadas de estímulo a integração entre os núcleos de inovação tecnológica e os demais ambientes promotores de inovação.

Assim, o cenário para a introdução do hidrogênio na economia é favorável. A Confederação Nacional dos Transportes (2023) apresentou um estudo sobre o hidrogênio renovável, destacando que sua aplicação nos modais existentes será essencial para viabilizar uma economia de baixo carbono.

Por se tratar de um combustível inovador, este pode gerar novos encadeamentos no setor produtivo, tanto para frente como para trás, sendo necessário a aplicação em investimentos em setores públicos e privados para alavancar o potencial do hidrogênio como combustível para os principais modais de transporte brasileiros.

⁷ A Fapemig realizou o lançamento da chamada pública 006/2023, intitulada “CIÊNCIA POR ELAS: FOMENTO À PARTICIPAÇÃO FEMININA NA CIÊNCIA, INOVAÇÃO E COLABORAÇÃO INTERNACIONAL”; e a chamada 010/2023 nomeada “INCREMENTO DA MATURIDADE DA INOVAÇÃO E ESCALONAMENTOS DE TECNOLOGIAS”, que possuem como um dos eixos prioritários o hidrogênio como fonte para energia.

Para tal, já foi lançado com o grupo Neuman & Esser (NEA) a pedra fundamental para construção da primeira fábrica de geradores de hidrogênio verde da América Latina, com investimentos previstos de R\$ 70 milhões. Esse marco é essencial para consolidar Minas Gerais como líder na transição energética no Brasil e um dos principais polos produtores de energia limpa do mundo, além de trazer atenção ao cenário mineiro de inovação para novas tecnologias que podem beneficiar o setor.

Com o objetivo de tornar esse mercado viável, empresas estrangeiras têm intensificado parcerias no Brasil, vislumbrando o alto potencial nacional dos setores eólico e solar. O país pode ser hub do hidrogênio de baixa emissão, já que, impulsionados pelo interesse de instituições estrangeiras, projetos para viabilizar a sua produção comercial no Brasil já superam US\$20 bilhões, com foco majoritário na exportação. Hoje as principais iniciativas se concentram no Porto do Pecém, no Ceará; no Porto do Açu, no Rio de Janeiro; e no Porto de Suape, em Pernambuco.

O Brasil dispõe de diversas alternativas para a produção de H2BE em processos industriais, apoiado por um setor químico robusto e uma das maiores cadeias mineradoras e siderúrgicas do mundo. Além disso, o país aproveita o resíduo energético da produção de celulose e papel, da biomassa agrícola e do biogás, reforçando seu potencial para a expansão do hidrogênio sustentável.

No Ceará, ao menos nove empresas, incluindo as australianas Energix Energy e Fortscue, a francesa Qair, a White Martins, a Neoenergia e a multinacional portuguesa EDP assinaram acordos para produção do combustível sustentável. O estado vem liderando a corrida do H2V no Brasil, e também assinou com a empresa alemã Linde mais um memorando de entendimento para implantação de uma unidade produtora de Hidrogênio Verde, no Hub de H2V Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP).

A Linde é representada pela White Martins no Brasil, que já havia assinado um memorando com o governo cearense com o mesmo propósito. A empresa enxerga o Ceará com grande potencial para a produção de energia limpa, devido às condições favoráveis de vento e sol, além da localização privilegiada do estado. O parque já atrai investimentos e visa tornar o estado nordestino em um ator global na produção, distribuição e exportação do combustível.

A [Federação das Indústrias do Estado do Ceará](#) (Fiec) faz parte de um grupo de trabalho criado para desenvolver políticas públicas de energias renováveis para a configuração do HUB de Hidrogênio Verde no Ceará. Um dos pontos fortes do estado é a estrutura do Porto de Pecém, empresa de economia mista controlada pelo governo do Ceará e pelo Porto de Rotterdam, que quer se transformar em importador de hidrogênio na Europa.

O empreendimento de Pecém é composto por uma área industrial, o porto e uma Zona de Processamento de Exportação (ZPE). A intenção é que todas as etapas do processo de produção do Hidrogênio Verde — incluindo geração da eletricidade, eletrólise da água, armazenamento e transporte — sejam concentradas no local para exportação do combustível. Se metade do potencial das energias solar e eólica, as duas fontes renováveis que mais crescem no Brasil, forem destinadas ao H2V, o Ceará poderá produzir cerca de 20 milhões de toneladas do

combustível verde, o que representa 13% do mercado global estimado para 2050, de acordo com dados da Fiec.

Embora o Brasil ainda tenha um longo caminho para estabelecer uma economia do hidrogênio, o país está posicionado estrategicamente para desempenhar um papel de destaque no mercado de hidrogênio global. A matriz elétrica brasileira é uma das mais limpas do mundo, com a energia renovável respondendo por mais de 80% da matriz elétrica do país. Aproveitando a vantagem competitiva da grande variedade de fontes para a produção de hidrogênio, os recursos abundantes para além da energia renovável, tais como gás natural, biomassa, etanol, biogás, e, ainda, reservatórios de hidrogênio natural, contribuem enormemente para o potencial do país de se tornar um grande produtor e exportador de hidrogênio.

No caso de Pernambuco, foi sancionada a Lei Nº 17.976, de 12 de dezembro de 2022, que “institui, no âmbito do Estado de Pernambuco, a Política Pública Estadual do Hidrogênio Verde”. Dentre as principais motivações a essa lei, destaca-se a possibilidade de substituição gradual dos combustíveis fósseis e também para o emprego na agricultura.

Antes do trâmite desse projeto de lei, o Porto de Suape, em Pernambuco, já estava em parceria com a francesa Qair para avançar com o projeto de R\$20 bilhões para hidrogênio verde, visando atingir a meta de carbono neutro. O investimento é planejado em quatro fases, até atingir uma produção de 480 mil toneladas de Hidrogênio Verde ao ano, para atender parte da demanda energética do mercado europeu. Até agora, há apenas um memorando de entendimento entre a companhia e o porto pernambucano. A Qair também possui um memorando similar com o Porto do Pecém, no Ceará. Além dela, o porto de Suape possui protocolos relacionados à produção de Hidrogênio Verde assinados com outras empresas, entre eles a Casa dos Ventos, a Neoenergia e a White Martins/Linde.

O complexo portuário também vem estreitando as relações com o Porto de Hamburgo, na Alemanha, para criação de um corredor de Hidrogênio Verde ligando o Brasil à Europa, a exemplo do que vem sendo desenhado entre o Porto de Pecém, no Ceará, com Roterdã, na Holanda. As principais questões discutidas entre os portos é a adaptação das instalações para transporte e armazenamento de amônia verde com segurança, uma vez que o material é altamente inflamável.

A estratégia de Pernambuco não é só exportar a molécula de Hidrogênio Verde, mas também produzir insumos que possam ser usados na indústria de baixo carbono no estado, sendo uma das opções estudadas a produção de Hidrogênio Verde em pequena escala, em uma espécie de geração distribuída. O modelo poderia agilizar essa transição para um cenário de descarbonização ao não depender da produção centralizada de Hidrogênio Verde.

No Rio de Janeiro, a Shell Brasil assinou, em junho de 2022, memorando de intenções com o Porto do Açu, para desenvolver um projeto de produção de energia nas instalações do porto, em São João da Barra, no Norte Fluminense. De acordo com a empresa, o projeto vai funcionar como um laboratório de pesquisa para desenvolver aprendizado, realizar testes de descarbonização e impulsionar essa indústria no país. A planta-piloto terá capacidade inicial de 10 MW e poderá chegar a 100 MW, obedecendo o plano de expansão da unidade.

Os recursos para a construção da unidade vêm da cláusula de Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação da ANP, que determina a aplicação obrigatória de um percentual da receita bruta da produção em projetos que estimulem a pesquisa e a adoção de novas tecnologias no setor de energia. A Shell Brasil deverá investir entre US\$60 milhões e US\$120 milhões dessa cláusula em 2022.

A disponibilidade de Hidrogênio Verde e energia renovável promoverá ainda mais a industrialização sustentável do Porto do Açu, incluindo a produção de aço verde, fertilizantes, produtos químicos, combustíveis e outros produtos manufaturados. De acordo com os termos do memorando de entendimento, o hidrogênio será destinado à produção de 250 mil toneladas de amônia por ano, amplamente utilizada na área de fertilizantes agrícolas. A própria usina deverá ser movida por projetos eólicos e solares.

No início de 2022, a AHK Rio abriu para submissões com objetivo de contratar uma aceleradora para apoiar a Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (AHK Rio) neste projeto, usando sua expertise e rede de contatos para promoção da inovação e fortalecimento de Early-Stage Startups, criando soluções para geração, distribuição e aplicação de Hidrogênio Verde no país.

O estado do Rio Grande do Sul já assinou seu segundo memorando de entendimento para produção de Hidrogênio Verde. Em dezembro de 2021, o estado fechou parceria com a empresa White Martins e, em março de 2022, fechou um novo acordo com a empresa Enerfin do Brasil. O Estado tem empreendido estudos para fazer uma transição para descarbonização por meio do uso do Hidrogênio Verde, criando um novo ramo na matriz econômica de alta tecnologia e valor agregado, uma vez que o Estado já opera com 80% da energia de matriz renovável, um dos requisitos fundamentais para produção de H2V.

A utilização de Hidrogênio Verde está de acordo com o compromisso assumido pelo Rio Grande do Sul de neutralizar as emissões de carbono no estado em 50% até 2030, meta assumida também pelo Brasil no Acordo de Paris. O texto do memorando define como objetivos o desenvolvimento de potencial projeto de Hidrogênio Verde no estado, a identificação de oportunidades para o desenvolvimento de projeto, o estabelecimento da intenção de encontrar oportunidades para desenvolver, conjuntamente, um projeto de produção de Hidrogênio Verde, buscar outras oportunidades relacionadas à área de energia ou de eletrificação de indústrias vinculadas ao projeto de Hidrogênio Verde; e viabilizar cooperação e sinergias entre as partes para identificar eventuais entraves regulatórios e fiscais e oportunidades para o desenvolvimento de projeto de Hidrogênio Verde.

O local visto como uma opção para receber o projeto é o porto do Rio Grande, em Rio Grande. É o maior distrito industrial do Rio Grande do Sul, com 2.580 hectares, retroáreas disponíveis, posição estratégica e privilegiada, que apresenta sinergia com cadeias produtivas. Além disso, existem vantagens logísticas, como escoamento da produção e recepção de matérias-primas, como pode ser comprovado pelo fato de que, em 2019, antes da pandemia, o fluxo foi de mais de 3 mil navios.

De acordo com dados da [Mckinsey & Company](#) (2021), o custo capital percebido pelos investidores de energia renovável é maior no Brasil do que em outros países competitivos, de forma que aqui atingimos a marca de 8% a 9%, ao passo que nesses países o custo chega à ordem de 7%.

Para geração e transmissão, ressalta-se a importância de haver uma legislação que acelere a expansão por meio renováveis. Para configurações on-grid, ou seja, configurações nas quais os sistemas estão ligados à rede pública de distribuição, os desafios se concentram nas taxas e custos para aplicações de médio e longo prazo. Além disso, será necessário um sistema de fiscalização quase em tempo real para formas de energia renovável para acordos de compra e venda de energia deste tipo. Para configuração off-grid, ou seja, configurações que utilizam baterias próprias, o desafio deve estar na regulamentação da legislação sobre os impactos ambientais e termos de uso.

Estudo da [Mckinsey & Company \(2021\)](#) estima que o Custo Nivelado do Hidrogênio Verde (LCOH) gerado no Brasil seria de aproximadamente USD 1,50/H₂ kg em 2030. Em 2040, este custo poderia cair para aproximadamente US\$1,255/kg, o que, no entanto, acende a urgência de investimentos para fortalecimento do setor em termos de incentivos econômicos e desenvolvimento de projetos de pesquisa. Corroborando com essa ideia, [estudo da Agência Internacional de Energias Renováveis - IRENA](#) (2020) demonstra que esse tipo de energia no seu estágio atual de produção ainda se encontra em valor pouco competitivo no mercado se comparado a outras fontes energéticas, já que o custo por quilograma equivale a US\$ 6, mas que com uma política de incentivo fiscal robusta, esse valor pode cair para US\$2 ou até US\$1 nos próximos anos mediante o desenvolvimento de pesquisas e investimento em tecnologia. Ademais, a IRENA (2020) apresenta dados de pesquisa que indicam que, para uma potencial redução do custo de geração de 1 MW por eletrólise, que a depender da fonte utilizada podem alterar o custo e consequentemente o preço final, deve-se priorizar o desenvolvimento de tecnologia em placas bipolares e a diversificação de fontes energéticas limpas, renováveis e baratas.

Logo, medidas iniciais devem analisar o custo efetivo para reduzir o valor da produção do Hidrogênio Verde, a começar pelos dois pontos citados anteriormente, e destacados no Gráfico 18, seguidos daqueles de maior potencial de redução e de peso no custo.

Gráfico 18 - Componentes do Sistema de Eletrólise com maior Contribuição no Custo Total

Figure 19. System components for a 1 MW PEM electrolyser classified based on contribution to total system cost and potential for cost reduction.

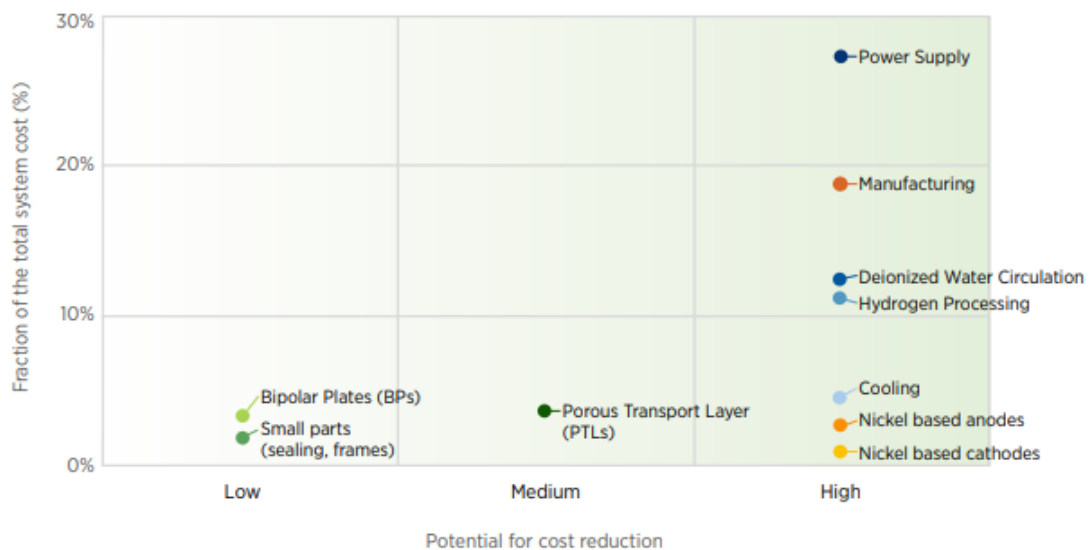


Fonte: IRENA, 2020

No caso da eletrólise alcalina, a oferta de energia ainda desponta como fator importante a ser barateado, contudo, cabe frisar que os custos de importação e de manufatura embutidos nos componentes tecnológicos são o segundo elemento mais relevante como objeto de políticas públicas para aumento da competitividade do Hidrogênio Verde.

Gráfico 19 - Componentes do Sistema de Eletrólise com maior Potencial de Redução de Custos

Figure 21. System components for a 1-MW alkaline electrolyser classified based on contribution to total system cost and potential for cost reduction.



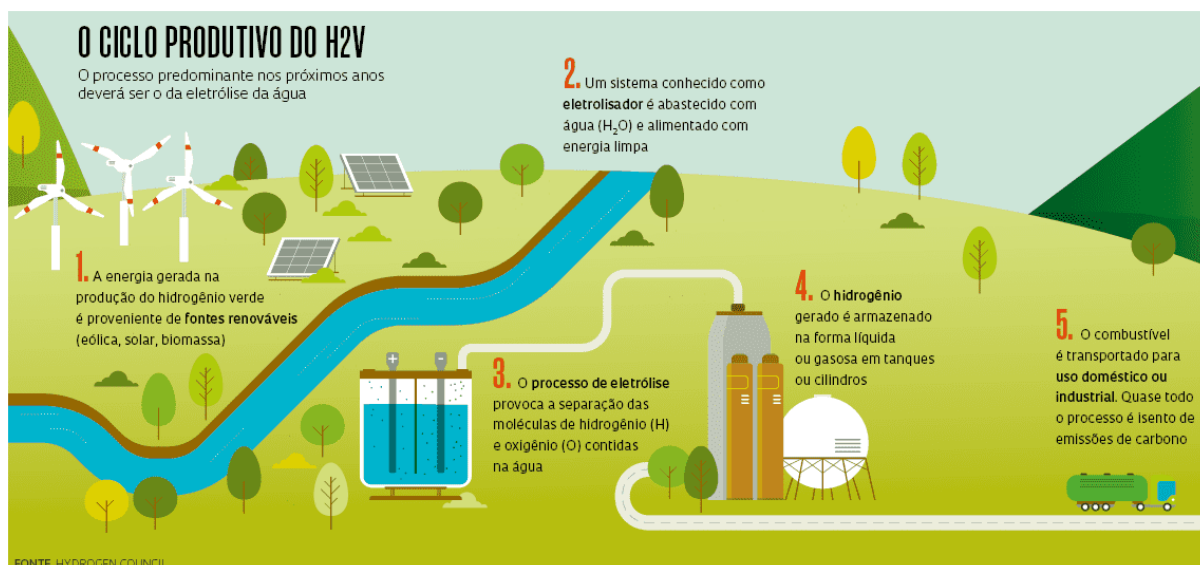
Fonte: IRENA, 2020

6. Rotas de produção

As rotas de produção são fatores chaves para proporcionar as condições necessárias de implementação da tecnologia do H₂V e devem ser pensadas de forma a aproveitar o potencial mineiro, principalmente levando em consideração que a matriz elétrica de Minas Gerais é mais de 95% renovável.

Especialistas preveem que o processo produtivo de H₂V predominante nos próximos anos será o de eletrólise da água. Esse método será obtido principalmente por plantas equipadas com eletrolisadores (equipamentos responsáveis pelo processo de eletrólise) abastecidos por fontes de energia renovável, garantindo que todo o processo seja isento de emissão de GEE, conforme ilustrado na Figura 8:

Figura 8 - Ciclo produtivo do H₂V



Fonte: ZAPAROLLI, Pesquisa FAPESP, 2022

A visão acerca do hidrogênio deve ser pragmática e, por isso, é necessário entender que cada “cor” de hidrogênio tem o seu papel na composição energética brasileira. Isso significa que as múltiplas rotas de produção devem ser consideradas, levando em conta as vantagens e desvantagens destas na produção de CO₂ que devem ser avaliadas a partir do seu ciclo de vida útil, em que a magnitude do potencial demandante pode requerer o uso de vários, ou mesmo todos, canais de produção. A Figura 9 retrata as diferentes fontes de H₂, o processo de produção de cada tipo e suas respectivas emissões de CO₂.

Figura 9 - Ciclo produtivo do H2V

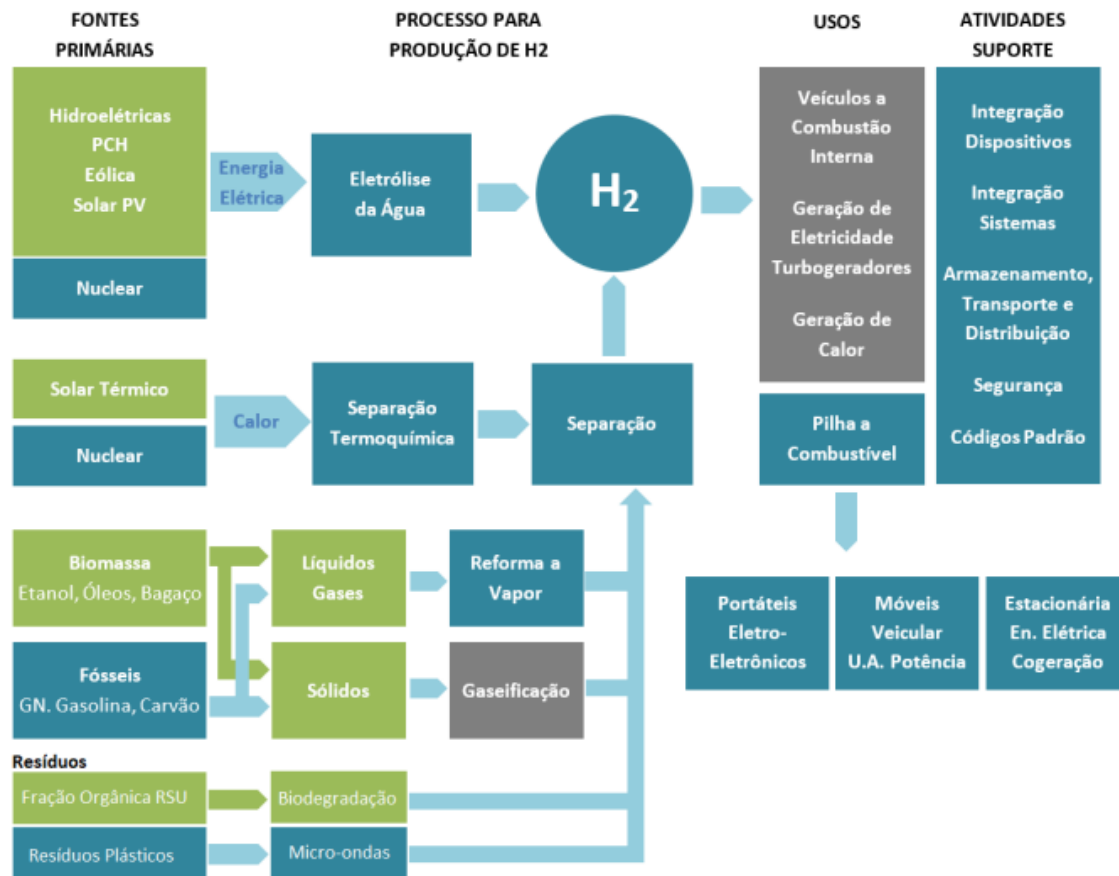
	 H ₂ Cinza	 H ₂ Azul	 H ₂ Musgo	 H ₂ Verde
Matéria-prima	Gás natural	Gás natural	Biomassa ou biocombustível	Água
Processo de produção	Decompor ¹ gás natural em H ₂ e CO ₂	Semelhante ao Cinza, mas com sequestro e/ou armazenamento de CO ₂	Reforma catalítica ³ , gaseificação ⁴ ou digestão anaeróbica ⁵ com ou sem CCUS (captura, utilização e armazenamento de carbono)	Decompor água em H ₂ e O ₂ em um eletrolisador movido a energias renováveis
Emissões de CO ₂ kg de CO ₂ / kg de H ₂ produzido	~10	~1-3 (mais CO ₂ armazenado)	n.d.	~0 (pressupondo-se uma matriz elétrica sustentável ²)

1. Processo: remoção de enxofre, produção de gás de síntese via reforma de metano a vapor (SMR) ou reforma térmica automática (ATR), reação de conversão de CO, purificação. Espera-se que este último ofereça maior eficiência em combinação com CCS. Além disso, o hidrogênio Cinza também pode ser produzido a partir da gaseificação do carvão.
2. Na Austrália, produzir hidrogênio a partir de eletrolisadores que operam com eletricidade de rede levaria a uma intensidade de emissão de 40 kg de CO₂/kg de H₂
3. Também chamado de reforma de hidrogênio ou oxidação catalítica, é um método de produção de hidrogênio a partir de hidrocarbonetos; 4. Processos que transformam combustíveis sólidos ou líquidos em mistura combustível de gases, gerando CO e H₂; 5. Degradação de compostos orgânicos em substâncias mais simples (p.ex.: CH₄ e CO₂), utilizando microrganismos anaeróbicos

Fonte: McKinsey & Company, 2021

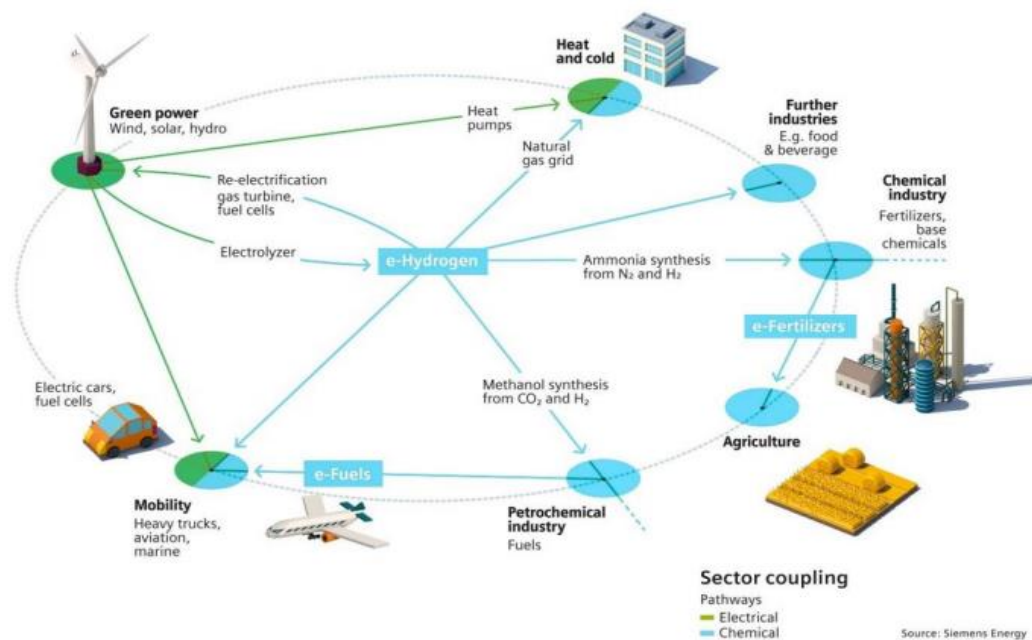
Segundo [estudo de Hidrogênio da McKinsey \(2021\)](#), a produção atual de hidrogênio, majoritariamente baseada em gás natural, resulta em hidrogênio cinza, altamente poluente. A captura e armazenamento do CO₂ gerado transformam o hidrogênio em azul, reduzindo significativamente as emissões. De forma alternativa, a eletrólise da água resulta em H₂V, enquanto a biomassa produz o chamado hidrogênio musgo. As Figuras 10 e 11 ilustram respectivamente, as rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio e como a integração de diferentes setores da economia (também denominado “acoplamento de setores”) pode ser realizada usando energia elétrica renovável como fonte energética e hidrogênio como vetor para diferentes aplicações.

Figura 10 - Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio



Fonte: Plano Nacional de Hidrogênio, 2021

Figura 11 - Acoplamento de setores usando energia elétrica renovável como fonte de energia e hidrogênio como o vetor para diferentes aplicações



Fonte: Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro, 2021

No estudo conduzido por Castro et al. (2023), são abordadas as rotas tecnológicas para a produção de hidrogênio. Essas rotas são classificadas como térmicas, eletrolíticas e fotolíticas, cada uma determinando a 'cor' específica da trajetória de produção. Cada categoria é então detalhada em processos distintos, aplicáveis a diversas matérias-primas, que variam desde recursos fósseis até água e biomassas.

- **Tecnologias Térmicas:**

Estas tecnologias baseiam-se em processos termoquímicos, onde a transformação de matérias-primas ocorre por meio de **reações químicas através da aplicação de calor**. No contexto da produção de hidrogênio, as tecnologias térmicas são fundamentais para a obtenção do gás de síntese a partir de diversas fontes, incluindo combustíveis fósseis e biomassa. As principais tecnologias térmicas incluem a Reforma a Vapor, Oxidação Parcial, Reforma Autotérmica, Gaseificação e Pirólise.

- **Tecnologias Eletrolíticas:**

Estas tecnologias se fundamentam no princípio da eletrólise, **onde a água é decomposta em hidrogênio e oxigênio utilizando eletricidade**. Diferentes métodos eletrolíticos, como eletrólise alcalina, eletrólise com membranas trocadoras de ânions (AEM) e eletrólise em alta temperatura (SOEC), que oferecem abordagens distintas para a produção de hidrogênio, com variações nos materiais e nas condições operacionais.

- **Tecnologias Fotolíticas:**

As tecnologias fotolíticas exploram processos fotoquímicos para a produção de hidrogênio. Este tipo de tecnologia **converte diretamente a energia solar em hidrogênio**. As abordagens incluem a decomposição foto eletrolítica da água, baseada em semicondutores, e a decomposição fotobiológica da água, que utiliza o metabolismo de algas e bactérias. Embora sejam inovadoras, enfrentam desafios como custos elevados e eficiências variáveis.

Na Tabela 8, são apresentadas as rotas tecnológicas definidas, associadas a suas principais aplicações e características.

Tabela 8 - Classificação de rotas tecnológicas para produção de hidrogênio

Tecnologia	Aplicação Principal	Características Relevantes
Térmicas		
Reforma a Vapor (Steam Reforming)	Produção em larga escala, indústrias petroquímicas e refinarias, produção de amônia (fertilizantes), metanol (combustível veicular), e produção de aço.	Menor custo, alta eficiência, emite CO ₂ como subproduto Tecnologia mais utilizada atualmente no mundo Dependendo da qualidade da matéria prima, cada 1 ton H ₂ gera 9 a 12 ton de CO ₂ .
Oxidação Parcial (Partial Oxidation)	Células a combustível veiculares e aplicações comerciais	Adequada para metano, biogás e óleo pesado, eficiência térmica 60-75%
Reforma Autotérmica (Autothermal Reforming)	Processos com flexibilidade e eficiência	Mantém composição do gás de síntese semelhante à oxidação parcial
Gaseificação	Gaseificação da biomassa e do carvão ocorre em temperaturas elevadas (acima de 700°C), sem combustão e na presença controlada de oxigênio e vapor.	Requer reator secundário para remover impurezas, biomassa como matéria-prima Gera o CO e CO ₂ , além de metano e outros gases causadores de efeito estufa. Adiciona processo para a captura do CO ₂ , armazenamento, para posterior utilização.
Pirólise	**Gás natural: Decomposição térmica da biomassa	Eficiência variável (35-50%), requer etapa adicional para gás de síntese
Decomposição termoquímica da Água	Desenvolvimento em cenários de alta temperatura	Processo em desenvolvimento, alta temperatura, membranas cerâmicas
Fotolíticas		
Decomposição foto eletrolítica da água	Sistemas isolados e remotos, infraestrutura elétrica limitada	Elevado custo, eficiências baixas (aprox. 0,06%), avanços em fotocatalisadores
Decomposição fotobiológica da água	Fase experimental, não aplicada em larga escala	Utiliza metabolismo de algas e bactérias, rendimento experimental até 10%
Eletrolíticas		

Eletrólise alcalina	Setores que demandam alta pureza de hidrogênio	Comercial desde 1890, solução aquosa alcalina, catalisadores com metais nobres
Eletrólise com membranas trocadoras de ânions (AEM)	Responde rapidamente a flutuações de corrente	Não utiliza metais nobres, resposta rápida a variações de corrente
Eletrólise em alta temperatura (SOEC)	Conduzida em temperaturas elevadas, aproveita calor industrial	Menor consumo de energia elétrica, utiliza calor de outros processos

Fonte: Elaboração própria , Castro et al. (2023)

As oportunidades e aplicações derivadas das diversas rotas de produção de hidrogênio são vastas e promissoras. Entre elas, destaca-se a solução inovadora de produção de Syncrude, um combustível obtido através de processos sustentáveis. Este método já está sendo implementado com sucesso no estado do Paraná, onde os resíduos da suinocultura são aproveitados (EPE, 2024).

Minas Gerais, sendo um dos principais polos de produção de suínos no Brasil, possui um potencial significativo para adotar essa tecnologia inovadora. A transformação dos resíduos da suinocultura em biogás, combinada com a geração de H₂V, não apenas reduz a carga ambiental desses resíduos, mas também abre caminho para a produção sustentável de Syncrude, um substituto ecologicamente correto do petróleo bruto (LAVOURA, 2023)

Minas Gerais pode se consolidar como produtor de equipamentos para produção do Hidrogênio, como eletrolisadores e reformadores. O estado já abriga a multinacional alemã Neuman & Esser, que assinou protocolo para produzir esses equipamentos e a Thyssenkrupp também tem unidade no estado e planeja, num futuro próximo, produzir eletrolisadores.

Sendo assim, para desenvolver uma economia do hidrogênio, cada região deve definir uma estratégia que seja adequada ao seu contexto, aos seus interesses e às vantagens competitivas. Um possível marco para entender as potencialidades das rotas de produção seria construir, a partir dos estudos de rotas, um “RoadMap”, onde seriam desenvolvidas as centralidades do potencial de produção dentro do Estado. Nesse sentido a rota de produção do hidrogênio de baixa emissão, através de disponibilidade de fontes de energia e matéria prima, tem a oportunidade de fomentar a transição energética do país, contribuindo para a descarbonização de setores mais complexos.

7. Desenvolvimento de infraestrutura

Visando uma infraestrutura adequada para o desenvolvimento da tecnologia do H2BE, deve-se pensar em pontos estruturantes fundamentais capazes de impactar fortemente no preço final do produto. São eles: transporte, estocagem, gasodutos e rotas de exportação.

Alguns contratempos podem desacelerar a utilização do hidrogênio de baixa emissão de forma ampla. O primeiro exemplo é o seu armazenamento, que exige um processo de compressão, implicando em alguma perda energética. Mas uma vantagem do H2BE é que ele é armazenável, permitindo o transporte de energia renovável entre grandes distâncias e através dos oceanos, facilita-se, assim, a exportação, por exemplo.

O transporte também é outro fator. Este pode ser feito de três principais formas: como gás (comprimido, tipicamente), liquefeito (tal processo de liquefação gasta energia, o que revela outra desvantagem) ou através de um outro produto químico (um *carrier*), como amônia ou metanol. Diante do fato do transporte por caminhões encarecer e tornar o projeto inviável, por sua vez, os gasodutos permitem um custo menor, porém, se a infraestrutura dessa rede for insuficiente, o transporte por caminhões será necessário (McKinsey, 2021).

Segundo [Estudo de Hidrogênio da McKinsey \(2021\)](#), a expectativa é que seja desenvolvida uma rede de dutos para transporte de hidrogênio gasoso, especialmente em regiões como a Europa, que deve se tornar um grande mercado. Para transporte em longas distâncias, ou na ausência de infraestrutura estabelecida, a amônia é o método mais maduro e promissor – mas que, de qualquer forma, exige custos e investimentos adicionais para produção da amônia de baixo carbono a partir do H2BE e, se necessário, para extração desse hidrogênio no destino (para algumas aplicações, a amônia pode ser utilizada diretamente).

Portanto, o desenvolvimento da infraestrutura em Minas deve priorizar o acesso de projetos de produção de H2 à gasodutos das redes de distribuição de gás natural, o acesso a redes de transmissão e distribuição de alta tensão e à infraestrutura elétrica em projetos piloto de produção de H2BE, e, por fim, a articulação e pesquisa para viabilização para transporte rodoviário do H2BE.

8. Incentivo à produção

Diversas empresas brasileiras estão anunciando projetos para a produção de H₂BE no Brasil, como a [UNIGEL](#), [FMG](#), [edp](#), [YARA](#), [FURNAS](#), [Hytron](#), [AES](#), [Itaipu Binacional](#), [Qair](#), [Neoenergia](#), [Votalia](#), [Engie](#), [Casa dos Ventos](#), [Enegix](#), [White Martins](#), [Shell](#), [Nexway](#), [Auren](#), [Raízen](#) e [PSR](#). Nesse sentido, segundo o [Monitor de Energia do Futuro \(2025\)](#), foram anunciados US\$30 bilhões em projetos de hidrogênio para o Brasil.

A Figura 12 demonstra a localização dos projetos anunciados. A concentração de tais projetos no Centro-sul e Nordeste do país é evidente e retrata o uso das vantagens competitivas, como proximidade com o mercado e questões geográficas favoráveis à geração de energia limpa.

Figura 12 - Principais localizações para projetos anunciados no Brasil



Fonte: Hydrogen Brazil, 2025

Diante da figura acima, os projetos em destaque em Minas Gerais são:

- A planta de hidrogênio renovável (H₂V) da **UHE Itumbiara** (MG/GO) foi a primeira a entrar em operação no Brasil e recebeu a certificação da CCEE, em novembro de 2023, comprovando a produção a partir de fontes renováveis. Operando desde 2021, já produziu mais de 3 toneladas de hidrogênio por eletrólise, utilizando energia hídrica e

fotovoltaica. O projeto-piloto serve como plataforma de estudos para a descarbonização de setores como agronegócio, indústria e transportes. Segundo a Eletrobras, a planta de UHE tem capacidade para produção de cerca de 100 kg/dia de H₂V.

- O Brasil importa mais de 95% de seus fertilizantes nitrogenados, e a Atlas Agro busca reverter essa dependência com a **planta Uberaba Green Fertilizer (UGF)**, a primeira do tipo no hemisfério sul. Utilizando energia renovável de fontes solar e eólica, a UGF produzirá nitrato de amônio (AN) zero carbono a partir de hidrogênio verde, substituindo fertilizantes importados de gás natural e carvão. Com capacidade para mais de 500 mil toneladas anuais, o projeto de engenharia começa em 2024, com produção prevista para 2028 e investimento estimado em US\$ 1 bilhão.
- Inaugurado, em setembro de 2023, o **Centro de Hidrogênio Verde (CH₂V) da UNIFEI** é o primeiro centro de pesquisas em hidrogênio verde do Brasil. Com recursos do governo alemão de quase R\$ 25 milhões, o CH₂V, pretende agregar várias frentes de pesquisas que incluem a análise do uso de hidrogênio verde em processos industriais, na geração de energia elétrica e na busca por alternativas sustentáveis para a mobilidade urbana.

Além dos empreendimentos supracitados, o Ministério de Minas e Energia (MME) divulgou, em agosto de 2025, o resultado da chamada pública para hubs de hidrogênio de baixa emissão de carbono para descarbonização da indústria. Dentre os projetos priorizados pelo MME para compor o Plano de Investimentos do Brasil no âmbito do *Climate Investment Funds – Industry Decarbonization* (CIF-ID), devido ao alto potencial de implementação até 2035, duas estão localizadas em Minas Gerais:

- Uberaba Green Fertilizer – Atlas Agro Brasil Fertilizantes LTDA; e
- Hub de Hidrogênio e Amônia – Cemig Geração e Transmissão S.A.

Em primeiro lugar, o licenciamento ambiental é um pilar para o incentivo à produção. Logo, a melhoria do processo de licenciamento ambiental para plantas de produção de hidrogênio, por meio da articulação junto à Secretaria de Meio Ambiente da instrução de processos de licenciamento de H₂BE levando-se em conta o impacto positivo de descarbonização desses projetos, é um caminho proposto.

Em segundo lugar, articular junto à Secretaria da Fazenda a aprovação do Tratamento Tributário Setorial para o hidrogênio de baixa emissão, de modo que este tenha incentivo estadual desde a produção até o consumo se faz necessário para fomentar o setor no estado mineiro. Devido ao incentivo fiscal, Neuman & Esser anunciou investimento na produção de Eletrolisadores em Minas Gerais. Além disso, foi aprovado Tratamento Tributário Setorial - TTS para o Hidrogênio pela SEF, detalhado da seguinte forma:

Tabela 9 - Detalhamento TTS para Hidrogênio em Minas Gerais

Produto beneficiado	Hidrogênio Verde: assim considerado o Hidrogênio no estado gasoso, gerado a partir da eletrólise da água, a qual se utiliza, para sua produção, da energia elétrica gerada por fontes de energia renováveis, sem emissão direta de dióxido de carbono na atmosfera no seu ciclo de produção, comprovado através de certificação da EMPRESA.
Diferimento do ICMS – aquisições	• Diferimento do ICMS devido nas importações do exterior de bens destinados ao ativo imobilizado, compreendendo máquinas e equipamentos, sem similar produzido no Estado, nos termos do art. 9º da Lei nº 6.763, de 26 de dezembro de 1975 e do Item 36, “b”, Parte 1, Anexo VI do RICMS, aprovado pelo Decreto nº 48.589, de 2023; • Diferimento do ICMS devido nas importações do exterior de matérias-primas, produtos intermediários e materiais de embalagem, sem similar concorrencial produzido no Estado, destinados exclusivamente à industrialização do Hidrogênio Verde, nos termos do art. 9º da Lei nº 6.763, de 26 de dezembro de 1975 e do Item 36, “a”, Parte 1, Anexo VI do RICMS, aprovado pelo Decreto nº 48.589, de 2023; • Diferimento do ICMS relativo ao diferencial de alíquotas devido nas aquisições de outras unidades da Federação, de bens destinados ao ativo imobilizado, compreendendo máquinas e equipamentos, sem similar produzido no Estado, nos termos do art. 9º da Lei nº 6.763, de 26 de dezembro de 1975, e nos termos do art.130 do RICMS, aprovado pelo Decreto nº 48.589, de 2023; • Diferimento do ICMS devido nas aquisições internas de bens destinados ao ativo imobilizado, compreendendo máquinas e equipamentos produzidos no Estado, adquiridos de estabelecimentos industriais em Minas Gerais, ou de distribuidor de mesma titularidade, localizados neste Estado, mediante anuência prévia dos fornecedores e nas condições definidas em Regime Especial, nos termos do art. 9º da Lei nº 6.763, de 26 de dezembro de 1975, e nos termos do art.130 do RICMS, aprovado pelo Decreto nº 48.589, de 2023; • Diferimento do ICMS devido nas aquisições internas de matérias-primas, produtos intermediários e materiais de embalagem produzidos no Estado, exceto energia elétrica, combustíveis, lubrificantes e serviços de comunicação, adquiridos de estabelecimentos industriais em Minas Gerais, ou de distribuidor de mesma titularidade, localizados neste Estado, mediante anuência prévia dos fornecedores e nas condições definidas em Regime Especial, destinados exclusivamente à industrialização do Hidrogênio Verde, nos termos do art. 9º da Lei nº 6.763, de 26 de dezembro de 1975, e nos termos do art.130 do RICMS, aprovado pelo Decreto nº 48.589, de 2023;
Diferimento parcial a 4% nas saídas internas do H2V	• Diferimento parcial do ICMS de forma que a carga tributária seja equivalente à aplicação do percentual de 4% (quatro por cento) sobre o valor da operação, do ICMS devido nas operações de saídas internas do hidrogênio verde, produzido pela EMPRESA no Estado de Minas Gerais, quando destinado a insumo energético nos processos industriais do destinatário mineiro, mediante termo de adesão do adquirente e nas condições definidas em Regime Especial, nos termos do art. 9º da Lei nº 6.763, de 26 de dezembro de 1975, e nos termos do art.130 do RICMS, aprovado pelo Decreto nº 48.589, de 2023. Observação: O diferimento nas operações internas do hidrogênio verde não se aplica às saídas destinadas aos fabricantes de fertilizantes, considerando que as saídas posteriores dos fertilizantes ocorrem com redução de base de cálculo sem manutenção do crédito, o que ensejaria no encerramento do diferimento. Nestes casos, o TTS Fertilizantes permite aquisição do hidrogênio verde, na qualidade de insumo, ao abrigo da isenção.

Crédito Presumido	• Crédito presumido do ICMS implicando recolhimento efetivo de 3% (três por cento) do valor das operações de vendas internas, quando não se aplicar o diferimento previsto no item 3 acima, do hidrogênio verde produzido pela EMPRESA no Estado de Minas Gerais, quando destinado a insumo energético nos processos industriais mineiros, vedado o aproveitamento de quaisquer créditos relacionados a estas operações, nos termos do inciso IX do art. 32-A da Lei nº 6.763, de 26 de dezembro de 1975 e nos termos do item 9 da Parte 1 do Anexo IV do RICMS, aprovado pelo Decreto nº 48.589, de 2023, tendo em vista o disposto nas Cláusulas nona e décima segunda do Convênio ICMS nº 190, de 2017, e em razão do disposto no art. 2º da Lei nº 23.090, de 2018. • Crédito presumido do ICMS implicando recolhimento efetivo de 3% (três por cento) do valor das operações de vendas interestaduais do hidrogênio verde produzido pela EMPRESA, no Estado de Minas Gerais, na condição de insumo energético destinado aos processos industriais, vedado o aproveitamento de quaisquer créditos relacionados a estas operações, nos termos do inciso IX do art. 32-A da Lei nº 6.763, de 26 de dezembro de 1975 e nos termos do item 9 da Parte 1 do Anexo IV do RICMS, aprovado pelo Decreto nº 48.589, de 2023, tendo em vista o disposto nas Cláusulas nona e décima segunda do Convênio ICMS nº 190, de 2017, e em razão do disposto no art. 2º da Lei nº 23.090, de 2018. • O destaque do ICMS devido nas operações internas próprias da EMPRESA será de 12%.
-------------------	--

Fonte: Elaboração própria, 2025

Em terceiro lugar, as linhas de financiamento são outro importante fator capaz de estimular a produção de hidrogênio. Nesse sentido, cabe uma articulação com BDMG para oferecer linhas de crédito para projetos em H2BE e para ser repassador oficial no estado de linhas de crédito de entidades de fomento internacionais. A negociação com entidades de bancos e fundos de investimentos internacionais para prover financiamento e *equity* para projetos em H2BE é um outro caminho.

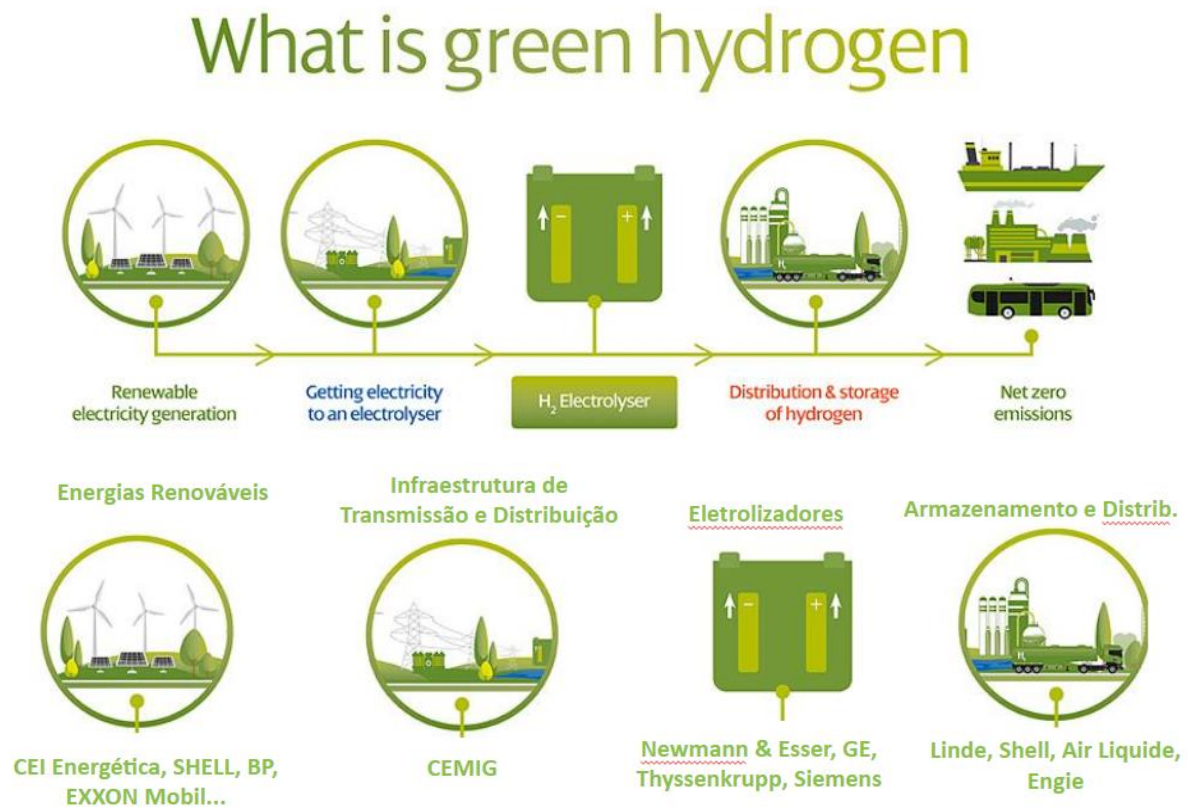
Algumas linhas de crédito já existentes do BDMG podem apoiar o desenvolvimento de projetos de hidrogênio de baixa emissão em Minas Gerais. As linhas BDMG Sustentabilidade e BDMG Sustentabilidade Autoconsumo disponibilizam crédito para financiamento de sistemas solares fotovoltaicos para empresas e para autoconsumo. Para projetos de eficiência energética e de geração de energias renováveis em geral, o banco dispõe da linha BDMG Sustentabilidade BEI. Para investimentos em capital ou financiamento de projetos em geral, as linhas disponíveis incluem a BNDES Finame, BNDES Automático, Finame Materiais Industrializados e a BDMG Investimentos. Enfim, para inovação, as linhas incluem a Pró-Inovação, em parceria com a Fapemig, e as quatro linhas Inovacred, junto à Finep, para financiamento de novos produtos, serviços e tecnologias, além de projetos de inovação de empresas e em parceria com ICTs e, enfim, de soluções em tecnologias 4.0 credenciadas.

A atração de investimentos também é uma das ações necessárias para o incentivo das rotas produtivas. A divulgação dos potenciais de Minas Gerais para o fomento da cadeia produtiva de H2BE visa atrair parceiros dispostos a investir na economia verde do estado.

Contudo, além disso deve haver prospecção de fornecedores para que toda a cadeia de suprimentos para produção de H2 (Eletrolisadores, Reformadores e Compressores) esteja em Minas Gerais e para a produção de eletrolisadores, de modo que MG se torne um *hub* de

produção de equipamentos da cadeia do H2BE para o Brasil e América Latina. Nesse sentido e levando em consideração a cadeia do H2BE, tem-se as principais empresas que devem compô-la em Minas Gerais, conforme a Figura 13.

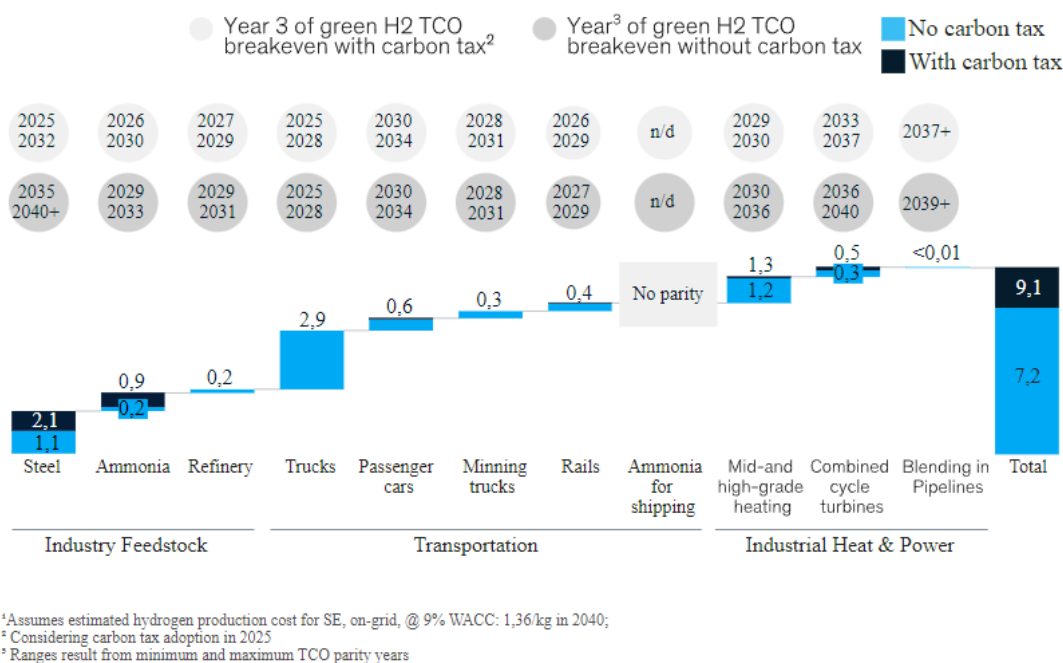
Figura 13 - Principais empresas da Cadeia do Hidrogênio



9. Estímulo da demanda

Estima-se que a demanda brasileira por hidrogênio supere 9 milhões de toneladas até 2040, conforme a Figura 14.

Figura 14 - Previsão para 2040 da demanda doméstica brasileira de hidrogênio em milhões de toneladas



Fonte: McKinsey & Company, 2021

Neste contexto, e para a consolidação da cadeia do Hidrogênio em Minas Gerais, é fundamental que se conceda incentivos fiscais para o setor, pois trata-se de uma nova tecnologia para geração sustentável de energia, que precisa de escala para tornar-se competitiva. Por isso, políticas públicas de incentivo têm papel fundamental nesse processo, sendo nítido os resultados colhidos, quando tais políticas são adotadas de maneira eficaz. Um exemplo bem sucedido é a aprimoração da legislação tributária e ampliação do incentivo à produção de energia elétrica de fontes renováveis por parte do Governo de Minas Gerais.

Outro grande exemplo é o estado do Ceará, que tem se consolidado como Hub de geração e exportação de Hidrogênio Verde, por meio da criação de ZPE para o H₂, atraindo mais de 29 bilhões de reais em investimentos, através de 17 protocolos de intenções firmados com empresas como [White Martins](#), [Neoenergia](#), [Engie](#), [Linde](#), [AES Brasil](#), [Fortescue](#), [Eneva](#), dentre outras.

A partir dessas informações, conclui-se, portanto, que estamos diante de uma oportunidade de consolidação de uma cadeia produtiva de bilhões de dólares em investimento, geração de empregos, transferência de alta tecnologia e de descarbonização, de maneira relevante, em atividades altamente poluentes.

Assim, levando-se em consideração a expertise do Governo de Minas Gerais na concessão de incentivos fiscais para atração de empreendimentos de geração de energia renovável, como se

percebe pelo absoluto sucesso do programa “Energias de Minas”, sugere-se a avaliação de alternativas de incentivos fiscais ao hidrogênio de baixa emissão, como a inclusão do H2BE como fonte renovável de geração de energia no artigo segundo, inciso IV, do [Decreto 46.296/2013](#) – “Programa Energias de Minas” para que, desse modo, projetos de geração de H2BE possam usufruir dos mesmos benefícios de outras fontes renováveis, como solar, eólica, biomassa etc. Tal benefício, pode ser considerado até mesmo uma extensão das outras fontes, uma vez que, o H2BE sendo gerado a partir de outras fontes renováveis, ele seria uma aplicação direta desse “fato gerador” que já conta com o benefício fiscal, principalmente os “off grid”.

Outra possibilidade de concessão de benefício fiscal seria a de Transferência de Crédito de operação credora para projetos relacionados à geração e/ou aplicação de H2BE. A criação de um Mapa da Demanda, que tenha possibilidade de uma visualização geográfica, também é visto como um meio de setorizar os empreendimentos e parcerias potenciais para desenvolver a produção e consumo por H2 no Estado. Por fim, a Tabela 9 apresenta informações sobre o diferimento de ICMS nas saídas internas de H2V, medida que pode estimular a demanda.

10. Hubs de hidrogênio

Estes centros estratégicos abrangem toda a cadeia produtiva do hidrogênio, desde a geração até a entrega final, desempenhando um papel vital na evolução do setor energético. Com o objetivo duplo de atender à demanda interna e explorar o mercado global, esses ecossistemas otimizam custos e eficiências ao integrar produtores e consumidores de hidrogênio em níveis local e regional. Concebidos para suprir as necessidades tanto do mercado interno, atendendo demandas locais e de indústrias externas, quanto para exportação em grande escala (EPE, 2024a), os hubs de hidrogênio visam não apenas benefícios econômicos, mas também a redução das emissões associada à produção e consumo de hidrogênio.

Os principais hubs de hidrogênio no mundo estão se consolidando em diferentes regiões, desempenhando um papel crucial na transição para uma economia baseada em hidrogênio. A China, líder mundial na produção de hidrogênio, tem tradicionalmente dependido de fontes poluentes, mas agora está orientando esforços em direção ao mercado de H2 renovável. A Europa, destacando-se como líder global, concentra 35% dos investimentos em projetos de hidrogênio, enquanto a América Latina e a América do Norte respondem por aproximadamente 15% cada (H2verdebrasil, 2024, MME, 2024). Esses hubs se tornam ecossistemas que integram diversas etapas da cadeia de valor do hidrogênio, otimizando custos e fomentando a sustentabilidade.

Embora a China seja o principal produtor mundial de hidrogênio, o país ainda busca se aventurar no mercado de hidrogênio renovável, demonstrando uma mudança de paradigma na busca por fontes mais sustentáveis (H2verdebrasil, 2024;MME, 2024).

Líder em propostas de projetos de hidrogênio, a Europa representa uma referência global, com 35% dos investimentos concentrados na região (EPE, 2024a). Por sua vez, tanto a América Latina, quanto a América do Norte contribuem significativamente para o desenvolvimento global de hubs de hidrogênio, refletindo a crescente importância do hidrogênio na matriz energética mundial (EPE, 2024a).

No contexto brasileiro, a formação dos hubs de hidrogênio se configura como uma colaboração estratégica entre diversos atores, incluindo empresas dos setores elétrico, logístico e industrial (com ênfase em siderurgia, fertilizantes e refinarias), além de entidades governamentais, reguladoras, universidades e institutos de pesquisa (H2verdebrasil, 2024). O país estabeleceu metas ambiciosas para a expansão desse ecossistema, planejando a implementação de plantas piloto de hidrogênio de baixa emissão de carbono em todas as regiões até 2025.

Um exemplo concreto é o Porto do Açu, localizado em São João da Barra, Rio de Janeiro, que emerge como um potencial hub de H2V. Em negociações avançadas com grandes players globais, o porto busca licenciamento de 1,2 milhões de metros quadrados para se estabelecer como um hub de H2V (H2verdebrasil, 2024). Outra iniciativa notável é o Hub de Hidrogênio Brasil-Reino Unido, uma colaboração multilateral que busca coordenar internacionalmente o desenvolvimento do hidrogênio, adotando uma abordagem integral e direcionada. Estes

esforços representam avanços significativos na consolidação do Brasil como um protagonista crucial no cenário global de produção e distribuição de hidrogênio.

10.1 Hub Mineiro de hidrogênio de baixa emissão

O Hub Mineiro de hidrogênio de baixa emissão (H2BE) trata de um polo logístico de produção e distribuição do H2BE para consumo, especialmente por parte da indústria minerária e siderúrgica, de modo que este seja uma conexão entre uma rede produtora de H2BE e grandes consumidores, com uso de infraestrutura compartilhada, gerando economias de escala e acelerando a adoção do H2BE como insumo energético limpo em Minas Gerais. Botelho e Gonçalves (2023) discutem em “[A importância da estruturação de hubs no desenvolvimento da economia do hidrogênio](#)” que Minas Gerais possui um potencial elevado para descarbonizar o setor energético nacional e a criação dos hubs de hidrogênios possuem relevância estratégica para a redução de custos de produção e melhorar o cenário mineiro para a competitividade no mercado do hidrogênio.

Portanto, a proposta do Hub Mineiro de H2BE inclui a concentração de empresas produtoras e consumidoras de H2BE, incluindo um corredor logístico, como redes locais de distribuição, ferrovias e terminais.

Caberá à Invest Minas e Governo do Estado, em cooperação com Cemig e Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (Codemge) a concepção do projeto, em parceria com a iniciativa privada, para que esta tenha as condições de realizar os aportes e alocação de recursos e tecnologia para viabilizar o Hub Mineiro de H2BE. O apoio de iniciativas de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) é um fator chave para a construção dos Hubs de hidrogênio e destaca-se o Programa de PD&I da Aneel, que criou a [Chamada Estratégica N°23/2023](#) denominada “Hidrogênio Renovável no contexto do Setor Elétrico Brasileiro”.

Diante do potencial para descarbonização, tamanho e diversidade da economia do estado, Minas Gerais pode abrigar mais de um “Hub de H2BE”, que poderiam ser setorizados ou regionalizados.

Inicialmente o local para abrigar o Hub poderia ser na região de Ouro Preto, onde se concentram um grande número de empresas potenciais consumidoras do hidrogênio, como mineradoras e siderúrgicas. Importante ressaltar que a região já conta com boa infraestrutura elétrica de alta tensão, gasoduto e ferrovias, além de ser uma região elegível para abrigar projetos de diversificação da pauta econômica da mineração, como os de sustentabilidade, gerando emprego, renda e preservação ambiental.

No entanto, o objetivo é estabelecer hubs regionais no Estado, visando aproveitar as vantagens locais e as vocações econômicas de cada região para impulsionar o desenvolvimento do mercado de hidrogênio. Essa abordagem permite a criação de polos estratégicos, otimizando a infraestrutura existente e promovendo a sinergia entre setores industriais, logísticos e energéticos.

Ao partir das características regionais, é possível direcionar investimentos de forma eficiente, garantindo que a produção e o consumo de hidrogênio estejam alinhados com as necessidades e oportunidades locais. Regiões com forte presença industrial, como o quadrilátero ferrífero, podem se beneficiar do uso do hidrogênio como insumo energético ou matéria-prima, enquanto áreas com abundância de fontes renováveis, como solar no Norte de Minas, podem se tornar centros de produção. Nesse contexto, o Triângulo Mineiro, com sua forte vocação agrícola e abrigando o principal polo da indústria agrossilvipastoril — uma das fontes de produção de biometano —, apresenta grande potencial para a rota de produção de hidrogênio a partir do biogás e do biometano. Além disso, a região pode se beneficiar como consumidora de amônia verde, derivada do hidrogênio, impulsionando a sustentabilidade no setor agrícola.

Portanto, a criação desses hubs favorece a atração de novos investimentos, o desenvolvimento tecnológico e a geração de empregos, consolidando o Estado como um ator relevante na transição energética. A descentralização da produção e do consumo também contribui para a segurança energética, reduzindo custos logísticos e facilitando a integração do hidrogênio à matriz energética.

11.Diretrizes

São diretrizes do PEH2BE:

- I. Descarbonização da economia mineira;
- II. Crescimento econômico de baixo carbono;
- III. Geração de renda e de empregos verdes;
- IV. Atração de investimentos para negócios sustentáveis;
- V. Expansão da geração de energia limpa, renovável e acessível;
- VI. Viabilização de produtos verdes;
- VII. Adesão ao hidrogênio de baixa emissão enquanto motor do crescimento limpo;
- VIII. Estímulo da oferta e da demanda do hidrogênio de baixa emissão no estado;
- IX. Promoção da pesquisa, do desenvolvimento tecnológico e da inovação.

12. Metas do Plano Estadual de hidrogênio de baixa emissão

Para o cumprimento das diretrizes apontadas no capítulo 11, o presente Plano apresenta as seguintes metas:

- Criação de Grupo de Trabalho junto a FIEMG para desenvolver um escopo de geração e distribuição de H₂ através de gasodutos em MG;
- Consultas junto a ANP, ANEEL, ABIMAQ/SINDIMAQ e EPE;
- Elaboração de eventos de promoção do H₂BE;
- Apresentação do tema a grandes empresas, potenciais produtoras ou usuárias do Hidrogênio e incentivá-las a instalar plantas piloto de produção e/ou consumo;
- Organização de Evento/Workshop estritamente técnico para apresentação das oportunidades e potencial do estado para grandes empresas potenciais produtoras e consumidoras;
- Proposta de criação de linhas de crédito em conjunto com o BDMG, extensivas à toda cadeia, inclusive para plantas piloto em H₂BE;
- Parceria com universidades e unidades Embrapii para provimento de P&D e mão de obra especializada nas plantas piloto;
- Parceria com instituições para criação de programa de inovação aberta e Corporate Venture Capital em H₂BE;
- Análise da possibilidade de uso de créditos tributários nos setores de siderurgia, agronegócio e automobilístico, para investimento em tecnologia e plantas de H₂ no estado;
- Criação de uma lista de forma a atrair interesses de produtores, transportadores e consumidores.

A elaboração das metas segue a lógica do cronograma de atividades disposto na Tabela 10:

Tabela 10 - Cronograma de atividades do Plano Estadual de hidrogênio de baixa emissão

Meta	Etapa	Especificação
Economia e negócios para Minas Gerais	Criação de grupo de trabalho	Criação de Grupo de Trabalho junto a FIEMG para desenvolver um escopo de geração e distribuição de H2 através de gasodutos em MG
		Consultas junto a ANP, ANEEL, ABIMAQ/SINDIMAQ e EPE
	Promoção do hidrogênio como ferramenta de atração de investimentos e geração de emprego e renda para o estado	Criação de regulação estadual que estimule o uso do hidrogênio e melhore o ambiente de negócios do estado
		Priorização de setores econômicos com maiores oportunidades para o hidrogênio, bem como aqueles com modelos de negócios favoráveis ao uso da fonte de energia
		Desenvolvimento de linhas de pesquisa e desenvolvimento e editais Fapemig para capacitação de mão de obra e aquecimento do setor
	Relatório e/ou apresentação final	Organização e sistematização do conteúdo da etapa para subsidiar as metas e etapas posteriores
Estratégias de Minas Gerais para o hidrogênio	Potencial e sinergias	Sinergias com outras fontes renováveis em uso no estado, como a solar fotovoltaica
		Potencial interno para a geração de hidrogênio em Minas Gerais, em relação ao potencial de se produzir externamente, fora do estado
	Planos de ação de curto, médio e longo prazos para o hidrogênio, envolvendo políticas públicas	Possibilidade de concessão de incentivos fiscais/creditícios
		Possibilidade de simplificação do licenciamento ambiental
		Criação de núcleos de pesquisas envolvendo o hidrogênio
		Centralização de informações referentes às pesquisas desenvolvidas para o hidrogênio
		Articulação das relações entre instituições de pesquisa e

		desenvolvimento com o mercado
		Promoção de eventos envolvendo o hidrogênio
		Atingimento de metas do PLAC para introdução do hidrogênio na matriz energética/elétrica do estado

Fonte: Elaboração própria, 2025

13. Estágios do Plano Estadual de hidrogênio de baixa emissão

O Plano Estadual de hidrogênio de baixa emissão pode ser elencado em estágios de desenvolvimento, conforme o avanço e a maturidade dos projetos e ambiente regulatório. Os estágios iniciais abrangem o detalhamento dos incentivos e ambiente regulatório e, mediante o desdobramento das negociações para atração de projetos para o estado, as etapas seguintes elencam medidas de estímulo à produção. E finalmente, a partir da implantação dos projetos, as iniciativas serão concentradas na escala e ampliação do número de projetos de H2BE em MG.

A primeira etapa do plano inclui programas para traçar diagnósticos do estado - importante para o entendimento do cenário do hidrogênio e das perspectivas para o estado -, seguido do lançamento do “Pacote” de Incentivos para Produção do H2 em Minas Gerais, da promoção das condições em vigor de incentivos ao H2 e do estudo do ambiente regulatório.

A segunda etapa do presente plano busca promover o “Pacote” de Incentivos lançado na primeira etapa; estimular os projetos de P&D em execução, como os que estão em andamento na Unifei, no CIT e na UFLA; avançar nas negociações do Tratamento Tributário Setorial (TTS); e conceituar o HUB mineiro de H2BE por meio da articulação com o biogás e o biometano.

Os objetivos da etapa seguinte compreendem a atração de investimentos de projetos de produção e consumo de H2 e a assinatura de MoU com empresas âncoras para viabilizar o HUB que fora conceituado na etapa anterior.

Já a quarta etapa visa a promoção do H2 para adesão de setores tradicionais (construção civil e agronegócio) ao uso do Hidrogênio e o desenvolvimento de infraestrutura de gasoduto, de linhas de transmissão e de logística.

Por fim, a quinta e última etapa terá foco na ampliação da adesão, das rotas de produção e da escala do H2 no estado.

A Tabela 11 abaixo ilustra com detalhamento as ações necessárias em cada etapa.

Tabela 11 - Etapas do PEH2BE

Detalhamento dos Incentivos e Ambiente Regulatório	Estímulo à Produção e Consumo	Escala
1) Isenção de ICMS na geração de renováveis. 2) Regime Especial para aquisição de Eletrolisadores e Reformadores 3) Priorização do Licenciamento ambiental 4) Crédito BDMG 5) Business Cases -Agronegócio Articulação com entidades de certificação e PNH2	1) Divulgação no mercado das oportunidades e benefícios de MG para o H2 2) Ampliação de programas de fomento à pesquisa, inclusive estimulando linhas com o setor sucroalcooleiro nas Univ. do triângulo 3) Design do Hub e negociação com empresas âncora de produção e consumo 4) Mapeamento da cadeia do biogás e estimular o fornecimento para produção do H2 5) Parceria com off takers (Vale, Gerdau, Arcelor...) para promover o consumo 6) Apresentação das oportunidades de descarbonização por H2 a setores tradicionais e ao mercado de capitais 7) Articulação com empresas de gasodutos, transmissão de energia elétrica e empresas de logística, para viabilização do desenvolvimento de infraestrutura adequada	Mediante ampliação das aplicações, adesão de setores e empresas, atração de investimentos de grandes multinacionais produtoras de H2 e investimento do mercado de capitais em projetos no estado, promover a escala de produção do H2. Este processo impactaria no preço, gerando um ciclo de investimentos e geração de empregos desse setor no estado

Fonte: Elaboração própria, 2025

14. Conclusão

A transição energética exige a ação coordenada entre atores públicos e privados para viabilizar a geração de energia limpa e segura. Além disso, a transição energética também demanda que os sistemas energéticos tenham seus funcionamentos pautados na incorporação da sustentabilidade, acessibilidade, segurança e redução dos impactos ambientais.

Para que a transição energética ocorra, é necessário que os sistemas energéticos se adaptem a um cenário no qual a neutralidade na emissão de GEE é um dos resultados almejados para o desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, o hidrogênio desponta como uma das soluções factíveis para suprir a demanda a transformação exigida pela transição energética.

A utilização de fontes energéticas que potencializam a descarbonização de setores intensivos em energia e que sejam compatíveis com o desenvolvimento sustentável, será decisivo para que Minas Gerais se torne capaz de mitigar e adaptar-se diante dos efeitos causados pelas mudanças climáticas. Por esse motivo, o Plano Estadual de Hidrogênio de Baixa Emissão (PEH2BE), além de abordar as possibilidades que a expansão da indústria do hidrogênio trará para os próximos anos, também norteia as diretrizes que são importantes para que a adesão da economia mineira ao H2BE resulte em crescimento econômico com valor agregado, geração de renda e empregos verdes e desenvolvimento sustentável.

Atualmente, a expansão da indústria do H2BE possui entraves relacionados às questões tecnológica, logística e de custos. No que tange a questão tecnológica, o PEH2BE possui como principais etapas a ampliação de fomento à PD&I; parcerias com universidades, unidades Embrapii, atores do setor público e privado para provimento de estratégias de desenvolvimento e mão de obra especializada. Um dos principais objetivos do PEH2BE é alavancar o desenvolvimento de tecnologias que proporcionem custo-benefício adequado para infraestrutura de transporte e armazenamento da indústria de hidrogênio.

Em relação à questão logística, o PEH2BE tem como uma das principais metas o estabelecimento do Hub Mineiro de H2BE para a concentração de empresas produtoras e consumidoras de H2BE. A instalação de um polo logístico deste nível pode servir para promover a conexão entre produtores e consumidores, acelerar o consumo de H2BE como fonte energética por meio do compartilhamento de uma infraestrutura logística, e com isso gerar economias de escala que se transformam em crescimento econômico.

Sobre a questão dos custos, o PEH2BE tem como metas impulsionar o investimento através de propostas como: a criação de linhas de crédito para a cadeia produtiva do H2BE; o uso de créditos tributários em indústrias intensivas em energia como mineração, siderurgia, cimento, fertilizantes, agronegócio e automobilístico. Além disso, o PEH2BE compreende a importância da adoção de incentivos fiscais na geração de energia renováveis, e regimes especiais para aquisição de máquinas e equipamentos utilizados no processo de obtenção de H2BE.

Em síntese, o PEH2BE é um instrumento que em congruência com os compromissos do Estado pactuados pelo Race to Zero de zerar as emissões líquidas de GEE até 2050, tendo em conta a

extrema competência que o Governo de Minas Gerais já possui no campo das energias renováveis. O PEH2BE estabelece as condições necessárias para que Minas Gerais tenha um ambiente regulatório e tecnológico para atração de investimento e expansão da cadeia produtiva do H2BE e; assim, descarbonizar a economia do Estado a partir da atração de investimentos sustentáveis, geração de renda e empregos verdes, crescimento econômico e desenvolvimento sustentável para Minas Gerais.

15. Referências

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica n.º 0047/2023–SPE/ANEEL: Abertura de Consulta Pública da Chamada n.º 23/2023 de Projeto PDI Estratégico - Hidrogênio Renovável no Contexto do Setor Elétrico Brasileiro** – SEB. Brasília, 2023.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relação de empreendimentos de Geração Distribuída**. [S.l.], ago. 2023. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacao-de-empresendimentos-de-geracao-distribuida>. Acesso em: 09 ago. 2023.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. [S.l.], ago. 2023. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel> Acesso em: 09 ago. 2023.

Agência Nacional de Mineração. Painel Dinâmico: Anuário Mineral Brasileiro Interativo. [S.l.], ago. 2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoizTRkNjI3MWEtMGI3My00ZTgzLWlYn2YtMzNjNDhjNTViM2Q2IiwidCI6ImEzMDgzZTlxLTc0OWItNDUzNC05YWZhLTU0Y2MzMTg4OTdiOCJ9&pageName=ReportSection99c5eaca1c0e9e21725a>. Acesso em: 10 ago. 2023.

ANTF - A Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários Mapa Ferroviário. Disponível em: <https://www.antf.org.br/mapa-ferroviario/>. Acesso em: 31 jan. 2024.

BOSTON METAL. Molten Oxide Electrolysis for steel decarbonization.[S.l.: s.n.][s.d.] Disponível em: <https://www.bostonmetal.com/green-steel-solution/> Acesso em: 09 ago. 2023.

BLOOMBERG. **Hidrogênio verde deve superar o azul até 2030. 2023**. Disponível em: <https://www.bloomberg.com.br/blog/hidrogenio-verde-deve-superar-o-azul-ate-2030/>. Acesso em: 27 fev. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. Brasília: MME/EPE, 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Brasília: MME/EPE, 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Programa Nacional do Hidrogênio, **Propostas de Diretrizes**. Brasília: MME/EPE, 2021

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Coordenação-Geral do Clima. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 5. ed. Brasília, 2020. Disponível em https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-aneais-de-emissoes-gee/arquivos/livro_digital_5ed_estimativas_aneais.pdf Acesso em: 09 ago. 2023.

CIBiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis - **Biogás. Biogásmap, painel dinâmico de plantas de biogás e biometano brasileiras**. Foz do Iguaçu, CIBiogás, 2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoizODc2NTlhOGltOTc2Ny00ZDc1LWI5MTMtYjYwZTRlYj>

[FiOWQ3IiwidCI6ImMzOTg3ZmI3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a3c113b0d](https://www.ciblogas.org.br/relatorio-001-2024)

CIBiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás. **Panorama do Biogás no Brasil 2023**. CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº 001/2024 – Foz do Iguaçu, CIBiogás, 2024.

Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável. **Roadmap: Os Caminhos do Setor Empresarial Brasileiro na Transição Energética Nacional**. [S.l.: s.n.] 2023. Disponível em: <<https://cebds.org/publicacoes/roadmap-os-caminhos-do-setor-empresarial-brasileiro-na-transicao-energetica-nacional/>> Acesso em: 09 ago. 2023.

Conselho Nacional do Transporte. **Hidrogênio renovável: uma das rotas para descarbonizar o transporte rodoviário**. Brasília, 2023. Disponível em: <<https://cnt.org.br/documento/d0b37807-75c4-494d-a296-1e050d5755b3>>

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Mapa de Condição da Manutenção**. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/mapa-de-gerenciamento/mapas-de-condicao-da-manutencao-icm-dezembro-2023/151-1-mapa_mg_icm.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2024.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Biogás no Paraná mira exportação de petróleo sintético para a Alemanha**. Disponível em: <<https://epbr.com.br/projeto-de-biogas-no-parana-mira-exportacao-de-petroleo-sintetico-para-refinarias-na-alemanha/>>. Acesso em: 1 fev. 2024.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Minas Gerais entra no mapa do hidrogênio verde**. Disponível em: <<https://epbr.com.br/minas-gerais-entra-no-mapa-do-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 4 fev. 2024a.

Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. **Proposta de Fomento à Produção de Gás Natural Renovável em Minas Gerais**. [S.l.: s.n.] 2023.

Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. **Propostas de Políticas para fomento ao biogás em Minas Gerais**. 2022. Disponível em: <<https://m.fiemg.com.br/dev~sistemafiemg/Noticias/Detalhe/politica-de-producao-de-biogas-e-biometano-no-estado-ganha-forma>>. Acesso em: 09 ago. 2023.

FGV Energia. **A Transição Energética no Setor de Transportes para Nações em Desenvolvimento: A Perspectiva Brasileira**. Rio de Janeiro. 2022. Disponível em: <<https://fgvenergia.fgv.br/publicacoes/cadernos-fgv-energia>>.

FGV ENERGIA. **Caderno de Transição Energética no Setor de Transportes**. Fundação Getulio Vargas, 2022.

GURLIT, Wieland et al. **Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo**. McKinsey & Company—Our Insights, 2021.

H2Hub. Disponível em: <<https://www.h2hub.tech/>>. Acesso em: 28 fev. 2025.

Hosokawa, K; Ochiai S. **POSCO to invest \$14bn in low-emissions steel production**. Nikkei Asia. 23 Setembro 2023. Disponível em: <https://asia.nikkei.com/Business/Materials/POSCO-to-invest-14bn-in-low-emissions-steel-production>. Acesso em: 09 ago. 2023.

H2 verde Brasil. **Hubs de hidrogênio verde e perspectivas para as diferentes regiões do Brasil**.

Disponível em: <<https://www.h2verdebrasil.com.br/noticia/hubs-de-hidrogenio-verde-e-perspectivas-para-as-diferentes-regioes-do-brasil/>>. Acesso em: 4 fev. 2024.

IRENA, IREA. **Green hydrogen cost reduction: scaling up electrolyzers to meet the 1.5 C climate goal**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.

Instituto 17. **Programa De Energia Para O Brasil (Bep)**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://i17.eco.br/bep/>. Acesso em: 09 ago. 2023.

LAVOURA, A. **Resíduo da suinocultura pode virar combustível para avião**. Disponível em: <<https://alavoura.com.br/pesquisa-inovacao/biocombustiveis/residuo-da-suinocultura-pode-virar-combustivel-para-aviao/>>. Acesso em: 1 fev. 2024.

MINAS GERAIS, **Rodovias** | MG.GOV.BR. Disponível em: <<https://www.mg.gov.br/pagina/rodovias>> Acesso em: 1 fev. 2024.

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, 2019.

MME - Ministerio de Minas e Energia. **Debate Hubs de Hidrogênio Verde nos Portos e Polos Industriais**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-debate-hubs-de-hidrogenio-verde-nos-portos-e-polos-industriais>>. Acesso em: 4 fev. 2024.

MINAS GERAIS. Lei Nº 24396, de 13 de julho de 2023. **Dispõe sobre a política estadual do biogás e do biometano**. Belo Horizonte, MG: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2023.

MINAS GERAIS. Lei Nº 23762, de 06 de janeiro de 2021. **Altera a Lei nº 6.763, de 26 de dezembro de 1975, que consolida a legislação tributária do Estado de Minas Gerais, e a Lei nº 14.937, de 23 de dezembro de 2003, que dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores - IPVA - e dá outras providências**. Belo Horizonte, MG: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2021.

MINAS GERAIS. **Decreto Nº 46296, de 14 de agosto de 2013**. Dispõe sobre o Programa Mineiro de Energia Renovável – Energias de Minas – e de medidas para incentivo à produção e uso de energia renovável. Belo Horizonte, MG: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2013.

Dominium. **Monitor Energia do Futuro**. Disponível em: <https://monitorenergiadofuturo.com.br/>. Acesso em: 28 fev. 2025.

OC – OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa: Relatório 2024**. 2024.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea, Brasília:Rio de Janeiro 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.38116/td2787>. Acesso em: 09 ago. 2023.

PEREIRA, Enio Bueno et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2017. Elaborada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, v. 2, 2017.

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

REIS, RJ d; TIBA, C. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais-Volume II**. Belo Horizonte: Editora Futura Express, 2016.

RUDRA, Tanya. **Green Steel Tracker: One-stop-shop for information, innovation, and investment**. Green Steel World. 30 mar. 2022. Disponível em: <https://greensteelworld.com/green-steel-tracker-one-stop-shop-for-information-innovation-and-investment>. Acesso em: 09 ago. 2023.

Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais. **Perfil do Agronegócio Mineiro**. Belo Horizonte, 2025. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/agricultura/documento/perfil-do-agronegocio-mineiro>. Acesso em: 27 fev. 2025.

Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. **Diagnóstico do Setor Mineral de Minas Gerais**. 2. ed. Belo Horizonte, 2022.

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

SOUZA, L. A. **Do Quadrilátero Ferrífero ao Quadrilátero Aquífero: territorialidades conflitantes na produção de um espaço social extensivo à Região Metropolitana de Belo Horizonte-MG**. Geosp, v. 25, n. 3, e-188865, dez. 2021. ISSN 2179-0892.

THE WORLD BANK GROUP. **Global Solar Atlas**. 2023. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map?c=-12.082296,-45.087891,4>. Acesso em: 09 ago. 2023.

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá. **Calculadora de LCOH**. Disponível em: https://ch2vunifei.shinyapps.io/calculadora_lcoh/. Acesso em: 27 fev. 2025.

WITECKA, Wido K at al. **15 Insights on the Global Steel Transformation**. Agora Industry. Berlin, Junho 2023. Disponível em: https://static.agora-energie.wende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021-06_IND_INT_GlobalSteel/A-EW_298_GlobalSteel_Insights_WEB.pdf. Acesso em: 09 ago. 2023.

ZAPAROLLI, Domingos. **Brasil prepara-se para iniciar produção de hidrogênio verde**. *Pesquisa FAPESP*, São Paulo, n. 314, abr. 2022.