

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Vítor Guedes Pinto

**Dinâmica e Composição da Matriz Energética
Industrial Brasileira: Análise Atual e Cenários
Prospectivos**

SÃO CARLOS -SP
2025

Vítor Guedes Pinto

**"Dinâmica e Composição da Matriz Energética Industrial Brasileira:
Análise Atual e Cenários Prospectivos"**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Rodrigo Béttega

São Carlos-SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Pinto, Vítor Guedes

Dinâmica e Composição da Matriz Energética Industrial Brasileira: Análise Atual e Cenários Prospectivos / Vítor Guedes Pinto -- 2025.

51f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Rodrigo Béttega

Banca Examinadora: Rodrigo Béttega, Adriana Paula Ferreira Palhares, Gustavo Dias Maia

Bibliografia

1. Matriz Energética. 2. Matriz Industrial. 3. Energias Renováveis. I. Pinto, Vítor Guedes. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do aluno Vitor Guedes Pinto. realizada em 14/07/2025:

Prof. Dr. Gustavo Dias Maia
UFSCar

Prof^a. Dr^a. Adriana Paula Ferreira Palhares
UFSCar

Prof. Dr. Rodrigo Béttega
UFSCar

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer primeiramente à toda minha família por todo apoio e estímulo incondicional durante minha jornada, sendo minha âncora nos diversos momentos difíceis que enfrentei, em especial minha mãe, Márcia, sendo o meu maior exemplo de como ser uma pessoa cristã e que consegue melhorar a cada vez que conversamos, meu pai, Jeferson, por sempre me incentivar a me arriscar nas diversas oportunidades que me aparecem, sendo também meu exemplo maior de resiliência, e meu irmão, Mateus, por ser minha figura pessoal de carreira.

Aos meus amigos de Rio Claro, que me acompanham por mais de uma década, sempre me apoiando quando precisava voltar para casa.

Aos meus amigos de curso, que sempre me ajudaram, me motivando nas dificuldades do curso, ajudando a estudar para provas difíceis e me animando nas turbulências da graduação.

À AEQ e EQ Júnior, entidades que entrei para conhecer mais sobre as pessoas e meu curso, e não só fizeram isso, como ajudaram a me tornar uma pessoa melhor, tanto nos âmbitos pessoais como profissionais.

Ao meu orientador, Dr. Rodrigo Béttega, que me apresentou o tema e me guiou por essa experiência de escrita científica que nunca havia experimentado, com muita disponibilidade e ativa participação.

E a Deus, sendo meu maior amigo e confidente durante toda essa jornada, que me deu sabedoria para lidar com as batalhas diárias em cada momento da graduação e fora dela, mantendo meu vigor durante todo o tempo que estive aqui e me ajudando, a ser cada dia melhor.

“Combati o bom combate, terminei a corrida, guardei a fé”

2 Timóteo 4:7

RESUMO

A matriz energética industrial brasileira passou por transformações significativas nos últimos anos, impulsionadas por crises econômicas, avanços tecnológicos e políticas públicas. Este trabalho analisa criticamente essa evolução, investigando as mudanças na participação de fontes energéticas renováveis (hidrelétrica, biomassa, eólica) e não renováveis (gás natural, carvão) no setor industrial, bem como os fatores políticos, socioeconômicos e tecnológicos que as determinaram. A metodologia combina revisão bibliográfica sistemática de artigos científicos indexados (Scopus, SciELO) e relatórios setoriais (EPE, ANEEL, MME) com análise quantitativa de dados energéticos. Os resultados evidenciam que, apesar da expressiva participação de fontes renováveis como bagaço de cana e hidrelétricas, persistem desafios como sazonalidade hídrica e dependência regional, destacando-se ainda o potencial de alternativas emergentes, como biogás, hidrogênio verde e solar térmico, cujo desenvolvimento demanda investimentos em pesquisa e políticas articuladas para garantir o crescimento industrial aliado à sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: matriz energética; matriz industrial; energias renováveis

ABSTRACT

The Brazilian industrial energy matrix has undergone significant transformations in recent years, driven by economic crises, technological advancements, and public policies. This work critically analyzes this evolution, investigating changes in the share of renewable (hydropower, biomass, wind) and non-renewable (natural gas, coal) energy sources in the industrial sector, as well as the political, socioeconomic, and technological factors that determined them. The methodology combines a systematic literature review of indexed scientific articles (Scopus, SciELO) and sectoral reports (EPE, ANEEL, MME) with quantitative analysis of energy data. The results reveal that, despite the significant share of renewable sources such as sugarcane bagasse and hydroelectric power, challenges like water seasonality and regional dependence persist. The study also highlights the potential of emerging alternatives including biogas, green hydrogen, and solar thermal energy, whose development requires research investments and coordinated policies to ensure industrial growth aligned with environmental sustainability.

Keywords: energy matrix; industrial matrix; renewable energy

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Consumo Energético Final por Setor no Brasil	8
Figura 2 - Utilização de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo	10
Figura 3 - Fontes energéticas industriais no Brasil no ano de 2023	14
Figura 4 - Estrutura do Consumo no Setor Industrial ao longo do tempo	15
Figura 5 - Consumo Industrial Elétrico no Brasil por Gênero	16
Figura 6 - Produção de Cana-de-Açúcar no Brasil em Reais	19
Figura 7 - Consumo de Gás Natural no Brasil em 2023 e 2022	21
Figura 8 - Consumo Energético no Setor Químico	22
Figura 9 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte	23
Figura 10 - Velocidade Média do Vento a 150m de Altura	26
Figura 11 - Parques Eólicos no Brasil e Produções	27
Figura 12 - Mapa Brasileiro de Irradiação solar direta	29
Figura 13 - Potencial de Geração de energia solar fotovoltaica	30
Figura 14 - <i>Pellet</i> de Bagaço de Cana	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estados com Maior Geração Hidráulica em 2023	24
Tabela 2 - Consumo Energético Global por Fonte	32

LISTA DE ABREVIATURAS

EJ.	exajoule - 10^{18} joules (J)
GN.	Gás Natural
MMgy	<i>Million Gallons per Year</i> (Milhões de Galões por ano)
tep.	tonelada equivalente de petróleo
Wh.	Watts-hora

LISTA DE SIGLAS

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN - Balanço Energético Nacional

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

Gasbol - Gasoduto Bolívia-Brasil

IEA - Agência Internacional de Energia

Mercosul - Mercado Comum do Sul

Proálcool - Programa Nacional do Álcool

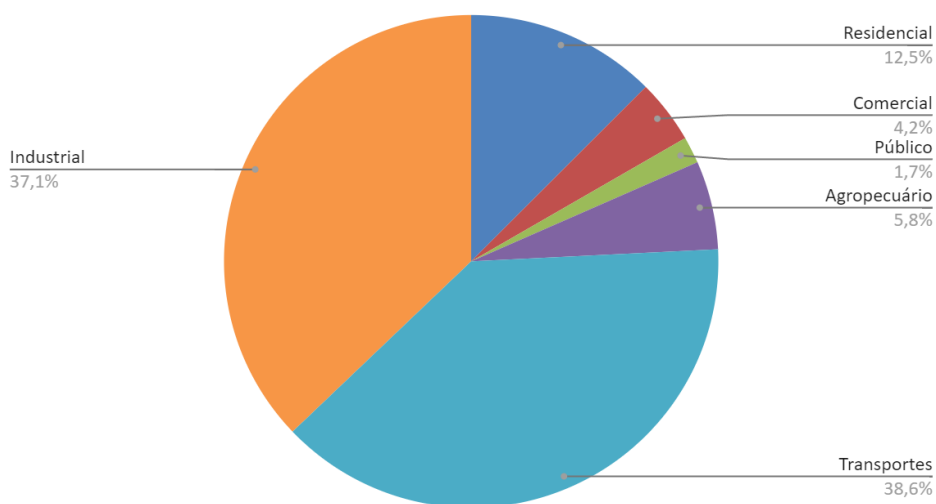
SUMÁRIO

1. Introdução	8
2. Estado da Arte: A História da Matriz Energética no Brasil	11
3. Materiais e Métodos	12
4. Resultados e Discussão	13
4.1 A Matriz Energética No Brasil Ao Longo Do Tempo	13
4.1.1 Bagaço de Cana e Biomassas	18
4.1.2 Gás Natural.....	20
4.1.3 Elétrica.....	22
4.1.3.1 Hidrelétrica	23
4.1.3.2 Eólica	25
4.1.3.3 Solar.....	28
4.1.4 Discussão	31
4.2 A Matriz Energética Global	31
4.3 Tendências no Mundo e Possibilidades no Brasil	33
4.3.1.1 Biogás.....	33
4.3.1.2 Hidrogênio verde	35
4.3.1.3 Solar térmico	37
4.3.1.4 Geotermia	38
4.3.1.5 <i>Pellet</i> energético de biomassa.....	39
4.3.2 Discussão	40
5. Conclusão	41
Referências	42

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética de um país representa o conjunto de fontes possíveis de energia que abastecem um país em seus âmbitos residenciais, elétricos, industriais e de transporte, proveniente de diversas formas, desde a queima direta de combustíveis para alimentação de calor para uma caldeira destinada a aquecer o vapor utilizado em uma usina de cana de açúcar até a energia elétrica usada para ligar a televisão de uma residência, gerada pela rotação de turbinas de uma hidrelétrica. A matriz energética é um dos alicerces do desenvolvimento econômico nacional, integrando um complexo sistema de fontes primárias e secundárias que atendem às demandas dos diferentes setores consumidores.

Figura 1 - Consumo Energético Final por Setor no Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do BEN (2024)

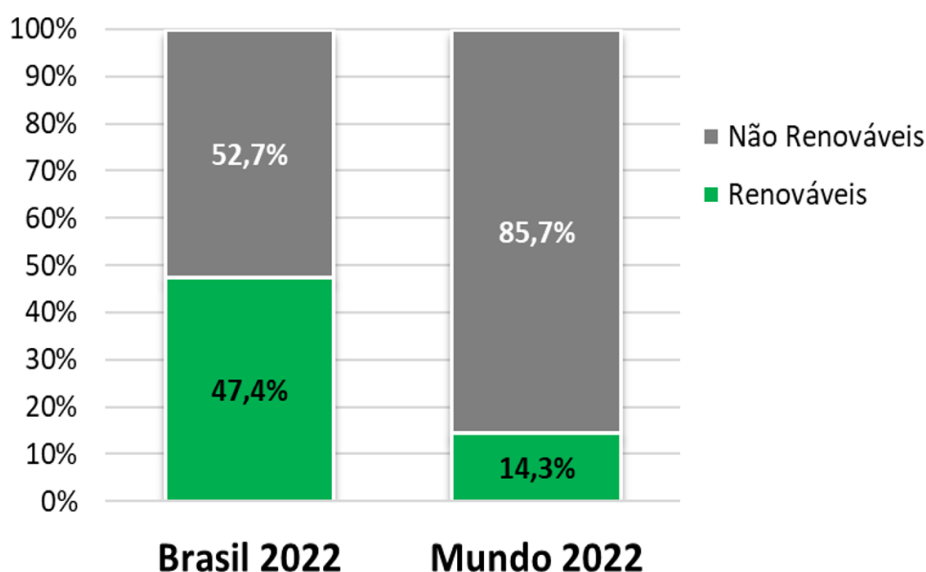
No contexto brasileiro, essa matriz apresenta características singulares. A Figura 1 indica o consumo nacional total de energia de 266 Mtep em 2023. Nessa figura é possível verificar que os setores que consomem mais energia são os setores Industrial e de Transporte, que combinados representam mais de 70% de todo consumo energético do país. A maioria deste consumo no setor de transporte advém do transporte rodoviário, representando quase 94% de todo consumo, enquanto no setor industrial os maiores consumidores são a indústria de alimentos e bebidas

(30%), muito alimentada pelo setor sucroalcooleiro e a indústria de ferro e metalurgia (28%)

Dados do período entre 1970 e 2023 indicam que houve um aumento significativo no consumo energético da indústria brasileira, saltando de 17.000 Mtep para aproximadamente 90.000 Mtep, representando um crescimento no consumo de energia de quase cinco vezes em pouco mais de cinco décadas. Esse consumo continua crescendo, apenas entre 2022 e 2023 houve um incremento no consumo energético industrial de 4,27%, conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024). Esses resultados apontam para uma contínua expansão do setor e sua crescente demanda por energia.

Diante desse cenário de crescente demanda energética preferencialmente renovável, o lançamento do programa Nova Indústria Brasil em 2024 representa um marco nas políticas públicas voltadas ao setor. Com investimentos previstos de R\$ 300 bilhões até 2026, a iniciativa estabelece metas ambiciosas para modernizar o parque industrial nacional até 2033, priorizando entre seus principais pilares sustentabilidade e a redução de 30% das emissões de carbono do setor industrial, por meio de instrumentos financeiros como linhas de crédito verde e mecanismos de mercado de capitais (MÁXIMO, 2024). A relevância dessa iniciativa se torna ainda mais evidente analisando o peso da indústria na economia nacional, respondendo por 25,5% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e gerando mais de 11 milhões de empregos diretos (CNI,2024).

Figura 2 - Utilização de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo



Fonte: EPE(2024)

Esse diferencial se torna ainda mais valioso quando consideramos o cenário internacional. Desde o Protocolo de Quioto (1997) até o Acordo de Paris (2015), os compromissos globais por redução de emissões têm pressionado cadeias produtivas em todo mundo para uma transição energética para fontes energéticas menos poluentes, o que posiciona o país como um caso de estudo relevante sobre como conciliar crescimento industrial e sustentabilidade.

No entanto, manter essa vantagem exige superar diversos desafios estruturais, afinal, ainda que renovável, nossa matriz enfrenta questões como sazonalidade hídrica por conta das hidrelétricas, dependência regional de combustíveis fósseis em determinados segmentos industriais e a necessidade de modernização de infraestrutura. Compreender como chegamos à configuração atual, analisando não apenas as fontes em si, mas os fatores econômicos, geográficos e tecnológicos que moldaram seu desenvolvimento são essenciais para planejar um futuro energético que sustente tanto a competitividade industrial quanto a segurança e sustentabilidade do suprimento.

Por isso, este trabalho se propõe a examinar em profundidade a evolução da matriz energética industrial brasileira, buscando identificar elementos que consolidaram sua configuração atual e possíveis caminhos para seu desenvolvimento no futuro a partir de novas fontes energéticas em desenvolvimento tanto nacional

quanto internacional, como uma maneira de concentrar o conhecimento e facilitar o acesso de quaisquer pessoas que queiram entender sobre a matriz energética brasileira e, possivelmente, aplica-la.

2. ESTADO DA ARTE: A HISTÓRIA DA MATRIZ ENERGÉTICA NO BRASIL

Para entender mais sobre a matriz energética industrial no Brasil, deve-se ter uma noção básica, ainda que sucinta, sobre a evolução histórica do setor energético no país.

A evolução histórica da matriz energética industrial brasileira pode ser compreendida através de três fases principais, cada uma delas marcada por transformações estruturais e grandes influências internas e externas. Durante as décadas de 1970 e 1980, a matriz era dominada por derivados de petróleo e pela lenha e carvão vegetal, juntos representando mais de 78% de todo consumo energético do país (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007), apresentando um país com poucas fontes energéticas de alto poder calorífico e altamente dependentes do petróleo no exterior, tornando-a extremamente dependente deste, o que foi comprovado com as crises do petróleo ocorridas em 1973 e 1979, sendo alvo de grande inflação e desequilíbrios na balança comercial (DE MELO, 2008).

Por conta destes choques, foi criado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em 1975, estabelecendo a produção de etanol vindo da cana no Brasil por meio de diversas fases de desenvolvimento (EDNALDO MICHELLON; ARACELLY; ALVES, 2008), com seu posterior uso em carros (primeiro diluído em gasolina e depois em carros flex), e assim ajudando a consolidar o bagaço de cana como a principal fonte de biomassa industrial, a fim de fornecer a energia necessária para as grandes usinas sucroalcooleiras.

Paralelamente, na década de 2000, se inicia um processo de diversificação de fontes energéticas com o início da operação do Gasoduto Bolívia-Brasil (Gasbol) em 1999, que permitira que o gás natural substituísse progressivamente o óleo combustível em diversos setores, como o químico e cerâmico (EPE, 2024), sendo o “Gasbol” um dos principais motivos, chegando a representar mais de 50% de todo consumo de gás natural brasileiro (SILVA et al., 2008).

O período atual, pós-2015 no cenário energético brasileiro é marcado pelo crescimento acelerado das energias renováveis, particularmente a energia solar, que

cresceu em mais de 10 vezes em produção entre 2014 e 2023 por conta de política públicas (EPE, 2024) e a energia eólica, que também apresentou expansão significativa, consolidando-se como uma das principais fontes da matriz elétrica nacional, principalmente na região Nordeste. Esses recentes avanços não só refletem o amadurecimento tecnológico e queda nos custos de implementação e uso, mas também como a influência do governo de maneira estratégica auxilia o aumento no uso de fontes energéticas mais limpas e sustentáveis.

Portanto, com estas informações históricas, é possível abordar o restante da pesquisa com uma compreensão mais sólida sobre a evolução e o contexto das fontes a serem analisadas. O levantamento realizado neste capítulo oferece a base necessária para identificar quaisquer lacunas no conhecimento atual, justificar a relevância do presente estudo e direcionar suas contribuições de forma alinhada com os avanços já consolidados na literatura pesquisada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho consiste em uma revisão da literatura de natureza aplicada, com abordagem qualitativa, objetivo exploratório e procedimento de pesquisa documental e bibliográfica, com objetivo de analisar e sintetizar os estudos e relatórios existentes sobre a matriz energética industrial brasileira e global, bem como suas fontes.

A pesquisa foi conduzida em plataformas específicas para conteúdo científico, como os periódicos da CAPES, *Google Scholar* e SciELO, complementada por relatórios técnicos de órgãos nacionais e internacionais, como a Agência Internacional de Energia (IEA) e nacionais como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Para garantir o refino da busca, o critério para escolha dos artigos foi a presença de informações históricas, quantitativas e ou qualitativas sobre a matriz energética ou fonte de energia, sem limitações de número de artigos, utilizando descritores específicos em português e inglês, priorizando termos como “Matriz energética industrial”, “fontes de energia na indústria” e “consumo energético industrial Brasil”. Já na busca internacional os descritores mais utilizados foram relacionados a “*industrial energy mix*”, “*industrial energy*” e “*energy consumption*”.

Após a coleta dos artigos e relatórios, foram construídas análises qualitativas sobre como as fontes energéticas foram estruturadas e chegaram na atual matriz, seguindo com o estudo para definir quais seriam as futuras tendências energéticas no

Brasil.

A motivação desta revisão se justifica para oferecer uma síntese atualizada do quadro atual e recentes transformações na matriz energética industrial, com *insights* relevantes para novas tecnologias, também contribuindo para a identificação de lacunas no conhecimento que podem orientar futuras pesquisas nessa área.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

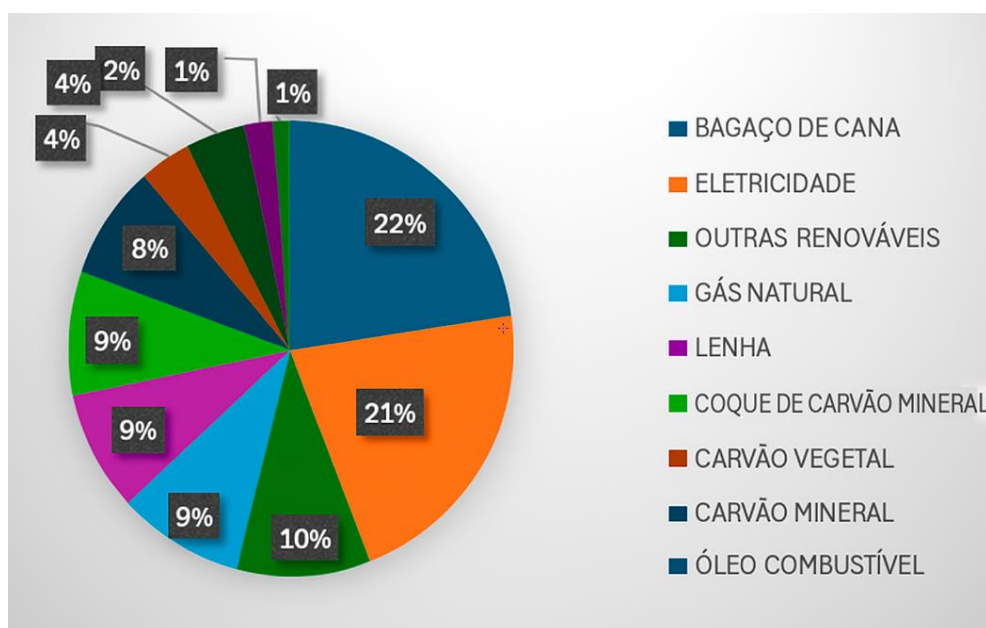
Para uma melhor visualização do cenário, será apresentada a atual matriz energética no Brasil, seguida de suas fontes e como estas estão compostas atualmente, seguido de uma discussão sobre os pontos fortes e fracos destas no Brasil. Para uma conclusão mais concisa, serão apresentadas informações sobre tecnologias sendo utilizadas ao redor do mundo para atender ao constante aumento da demanda energética seguido de outra discussão, com a finalidade de trazer à tona os fatores que influenciariam estas fontes no Brasil.

4.1 A MATRIZ ENERGÉTICA NO BRASIL AO LONGO DO TEMPO

A matriz energética brasileira passou por profundas transformações ao longo do último século, refletindo as mudanças econômicas, tecnológicas e políticas do país. Este capítulo traça um panorama geral dessa evolução em todos os setores de consumo, desde o residencial e comercial até o industrial, balizando as análises detalhadas das principais fontes energéticas que serão desenvolvidas nos capítulos subsequentes.

Como demonstrado pela Figura 3, em 2023, dentre as principais fontes energéticas no setor industrial, as maiores representantes foram o bagaço de cana, a eletricidade (com sua maior parcela proveniente de fontes renováveis) e o gás natural. Essa realidade contrasta muito com a matriz de 1970, onde, além do consumo energético industrial ser menor, havia uma gigantesca dependência de fontes não renováveis derivadas de petróleo, principalmente o óleo combustível.

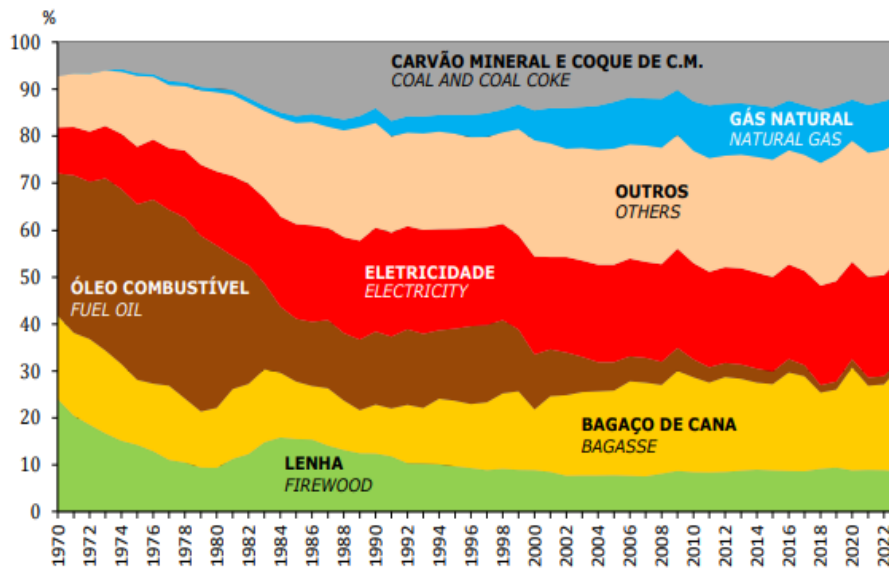
Figura 3 - Fontes energéticas industriais no Brasil no ano de 2023



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do BEN (2024)

A matriz energética industrial brasileira passou por profundas transformações nas últimas cinco décadas (Figura 4), marcadas pela redução gradual do consumo de fontes não renováveis, especialmente de derivados de petróleo, e pelo aumento das energias renováveis. Essa transição foi impulsionada, em grande parte, pelas crises internacionais do petróleo em 1973 e 1979, que expuseram a vulnerabilidade energética do Brasil, então dependente de importações para suprir quase 80% de seu consumo. Na época, o petróleo e seus derivados representavam mais de 70% da energia utilizada no país, com o Iraque e Arábia Saudita sendo responsáveis por 55% do abastecimento.

Figura 4 - Estrutura do Consumo no Setor Industrial ao longo do tempo



Fonte: BEN (2024)

Diante desse cenário crítico, o governo brasileiro adotou medidas urgentes para reduzir a dependência externa, destacando-se o Programa Nacional do Alcool (Próalcool), lançado em 1975. O programa incentivou a produção de etanol anidro, misturado à gasolina e, após a segunda crise do petróleo em 1979, expandiu-se para promover o uso do álcool hidratado como combustível principal em veículos. Essa iniciativa não só diminuiu a pressão sobre as importações de petróleo, mas também ajudou a consolidar a cana-de-açúcar como uma das principais fontes renováveis da matriz energética nacional.

Já no setor industrial, os efeitos dessas crises foram muito evidentes. A lenha, que era uma das principais fontes de energia na década de 1970, perdeu participação devido ao crescimento de outras fontes energéticas, como o óleo combustível. Porém, após o segundo choque do petróleo, em 1979, a lenha voltou a crescer, especialmente na primeira metade da década de 1980, em resposta à perda de competitividade do óleo combustível. A partir dos anos 2000, a lenha manteve-se estável por conta da indústria de papel e celulose, muito impulsionada pelas exportações para a China.

O óleo combustível, que dominava a matriz industrial nos anos 1970, sendo o principal combustível em diversas indústrias da época, como as indústrias de cimento, têxteis, mineração e química, enfrentou quedas acentuadas após os choques do petróleo, perdendo espaço para fontes como o gás natural e eletricidade, queda essa

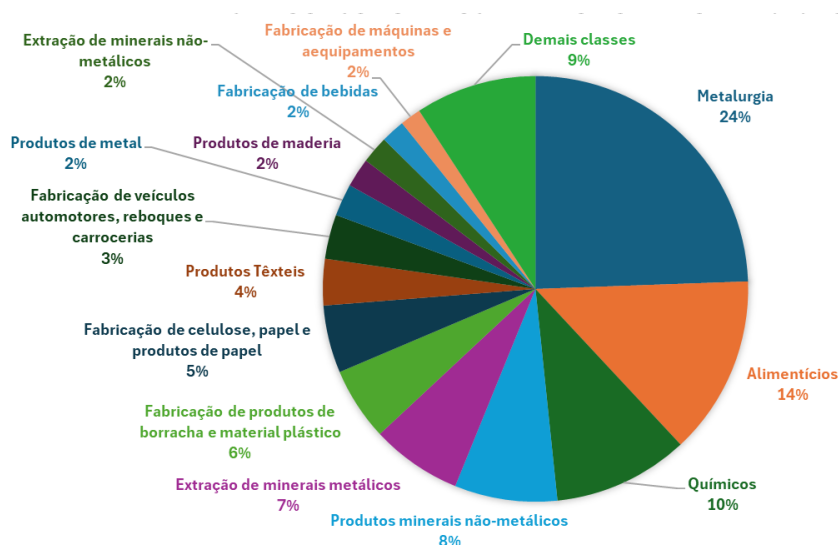
ainda mais acentuada a partir da década de 1990, com o início das operações do Gasoduto Bolívia-Brasil (Gasbol).

O carvão mineral e o coque de carvão tiveram trajetórias distintas. O consumo de carvão metalúrgico, essencial para a siderurgia, cresceu até a década de 1980 impulsionado pelo Plano Siderúrgico Nacional e acabou enfrentando quedas nos anos 1990 devido à baixa demanda por aço. Já o carvão vapor, utilizado em caldeiras, perdeu participação para outras fontes com logística facilitada e melhores custos, principalmente o gás natural.

Outras fontes, como a lixívia (subproduto da produção de celulose) e o coque de petróleo, ganharam relevância a partir dos anos 2000. A lixívia, em particular, tornou-se a principal fonte no segmento de papel e celulose, impulsionada pela expansão das exportações, já o coque de petróleo foi amplamente adotado na indústria do cimento.

Ao analisar o panorama industrial brasileiro no período recente conforme ilustrado na Figura 5, observa-se que os setores de metalurgia, alimentos e bebidas, e química se consolidaram como os maiores consumidores de energia no país desde 2013 segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2021 (EPE). Essa hierarquia reflete a estrutura produtiva nacional, caracterizada pela forte presença da indústria intensiva em energia, como siderurgia e mineração, além de um robusto parque produtivo de açúcar (alimentos).

Figura 5 - Consumo Industrial Elétrico no Brasil por Gênero - GWH



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2021)

No ano de 2020, 43,6% da energia elétrica destinada ao consumo industrial foi utilizada unicamente para os ramos de metais, incluindo setores metalúrgicos, indústrias de transformação de outros minerais e de extração de metais. Para este gráfico não foi considerado o gasto energético de usinas de cana de açúcar e álcool por estas não usarem a rede tradicional de energia elétrica.

A indústria metalúrgica se mantém como a principal consumidora de energia elétrica no país, situação que decorre da intensidade do uso de energia em seus processos produtivos. Os altos-fornos siderúrgicos, as linhas de laminação e especialmente a produção de alumínio primário demandam quantidades substanciais de energia. Esse setor apresenta uma dupla dependência energética, utilizando simultaneamente grandes volumes de eletricidade e carvão mineral, principalmente na forma de coque metalúrgico. Contudo, a partir de 2011, esse segmento sofreu os impactos da crise econômica, manifestados na redução da produção de aço.

O setor de alimentos e bebidas ocupa a segunda posição no consumo industrial de energia elétrica no Brasil. Dados de 2019 mostram que 68% da energia utilizada por esse setor foi proveniente do bagaço de cana-de-açúcar. Essa característica está diretamente relacionada à integração entre a indústria de alimentos e o setor sucroalcooleiro, onde o bagaço, como resíduo da produção de açúcar e etanol, é reaproveitado como combustível para geração de energia, agregando valor a um resíduo que seria descartado previamente. Além da indústria do açúcar e álcool que ocupam grande volume, vale ressaltar que as necessidades energéticas gerais desse ramo industrial são muito variadas, abrangendo desde o uso intensivo da energia térmica para processamento e refrigeração até o consumo elétrico para operações de embalagem e sistemas automatizados.

Finalmente, a indústria química se destaca pelo alto gasto energético em processos como a síntese de fertilizantes e produção de petroquímicos básicos, assim tendo o gás natural como seu principal insumo energético, especialmente nos grandes polos industriais de Cubatão (São Paulo) e Camaçari (Bahia), onde, também apresenta demanda significativa de energia elétrica.

Ao examinar as tendências do período 2013-2020, identificam-se três movimentos principais no consumo energético industrial. Primeiramente, observa-se uma queda generalizada no consumo após 2014, reflexo direto da recessão econômica que afetou particularmente setores como siderurgia e química.

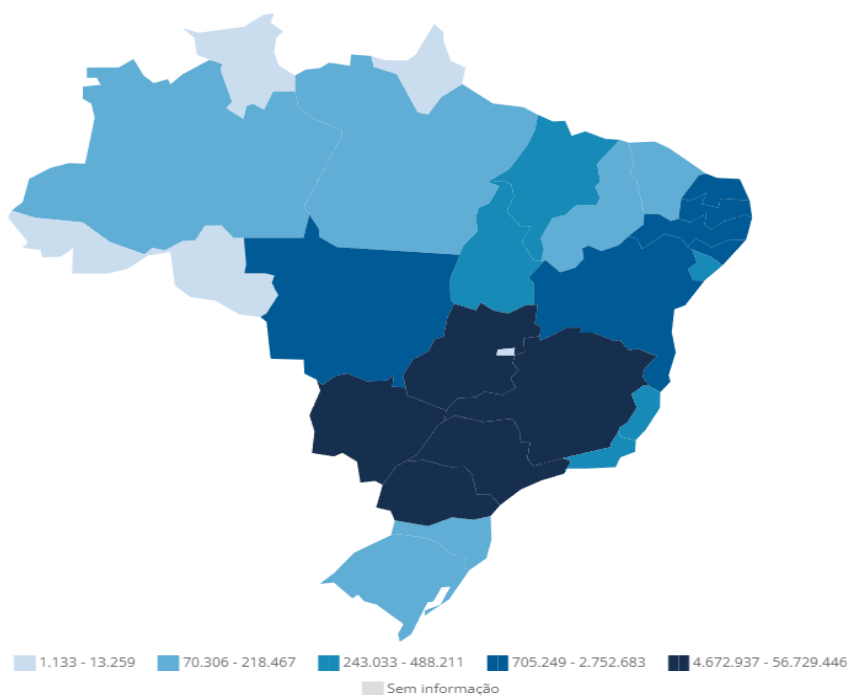
Paralelamente, ganha força um movimento de aumento da eficiência energética, com adoção crescente de tecnologias como sistemas de cogeração, especialmente visíveis no caso das usinas sucroalcooleiras que utilizam bagaço de cana como fonte energética. Por fim, consolida-se uma tendência de substituição do óleo combustível por fontes como gás natural e biomassa em diversos processos industriais, movimento que combina redução de custos com menores impactos ambientais.

Em síntese, o perfil do consumo industrial de energia no Brasil mantém sua característica de dominância por setores tradicionais, porém em um contexto de transição gradual para fontes renováveis e maior eficiência energética. Enquanto a eletricidade permanece como insumo fundamental para os processos industriais, ganham espaço tanto os sistemas de autoprodução de energia, exemplificados pelas usinas de cana-de-açúcar, quanto o uso crescente do gás natural como alternativa aos derivados de petróleo. Apesar dos desafios econômicos recentes, a indústria nacional demonstra avanços consistentes na construção de uma matriz energética mais diversificada e sustentável, embora ainda mantenha características estruturais que refletem seu histórico de desenvolvimento industrial.

4.1.1 Bagaço de Cana e Biomassas

A cana de açúcar é uma das principais culturas no Brasil. Segundo a CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), apenas na safra 2023/2024 foram produzidas 713,2 milhões de toneladas de cana ao redor do Brasil, com sua produção concentrada no Sudeste, mais especificamente em pontos do interior paulista, e no litoral nordestino, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Produção de Cana-de-Açúcar no Brasil em Reais



Fonte: IBGE (2023)

Para conseguir os produtos definidos (açúcar e álcool), a cana de açúcar tem seu caldo extraído, passando pelo processo de moagem, onde há a separação do caldo e do bagaço, onde o caldo segue para os outros processos industriais a fim de ser transformado em etanol ou açúcar, e o bagaço se transformará em energia.

O Bagaço de cana representa desde 2006 mais de 20% de toda fonte de energia utilizada no setor industrial brasileiro, sendo principalmente utilizada nos setores alimentícios e de bebidas. Isso se dá pelo consumo deste em usinas, onde é aproveitado *in loco* como combustível das caldeiras, gerando vapor tanto para aquecimento das próprias instalações da usina, que produzirá açúcar e álcool, também reaproveitando parte da energia para produção de energia elétrica para venda às concessionárias locais.

A energia vinda do bagaço de cana vem de sua própria queima, que ajuda a aproveitar este resíduo, onde na maior parte das vezes é o suficiente para atender a demanda energética da usina inteira. Tal Processo é chamado de Cogeração, A Resolução Normativa Nº 235, de 14 de novembro de 2006, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), define cogeração como o “processo operado numa

instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária, onde a instalação específica denomina-se central termelétrica cogeneradora, cujo ambiente não se confunde com o processo ao qual está conectada”.

Assim, a queima do bagaço de cana, vindo do processo de moagem aquece a água presente na caldeira da usina, gerando vapor de alta pressão, utilizada primariamente para mover as turbinas de moenda de cana entre outras utilidades. Parte deste vapor pode ser direcionado para turbinas de geração elétrica, o que possibilita que a usina consiga tanto suprir sua própria demanda elétrica para outras utilidades como também possibilita no caso de excedente de energia elétrica, fornecê-la à rede, gerando uma relação de independência perante a possíveis crises nas redes elétricas locais.

Além do bagaço de cana-de-açúcar, que já desempenha papel central na produção de bioenergia no país, outras culturas agrícolas poderiam contribuir significativamente para a matriz de biomassa, como o milho, a soja e o sorgo, que são *commodities* que ocupam vastas áreas cultivadas no Brasil, gerando resíduos como cascas, palhas e sabugos durante a colheita que poderiam ser aproveitados energeticamente.

Diferentemente do bagaço da cana, que é processado diretamente nas usinas para cogeração de energia, esses resíduos de milho, soja e sorgo não passam por beneficiamento industrial em grande escala, sendo muitas vezes deixados no campo ou utilizados apenas para fins secundários, como alimentação animal ou compostagem. No entanto, esses materiais possuem potencial energético relevante para combustão direta e, podem ser utilizados como bagaço de cana, como combustível de queima para uso industrial ou geração de energia (SILVA, 2021).

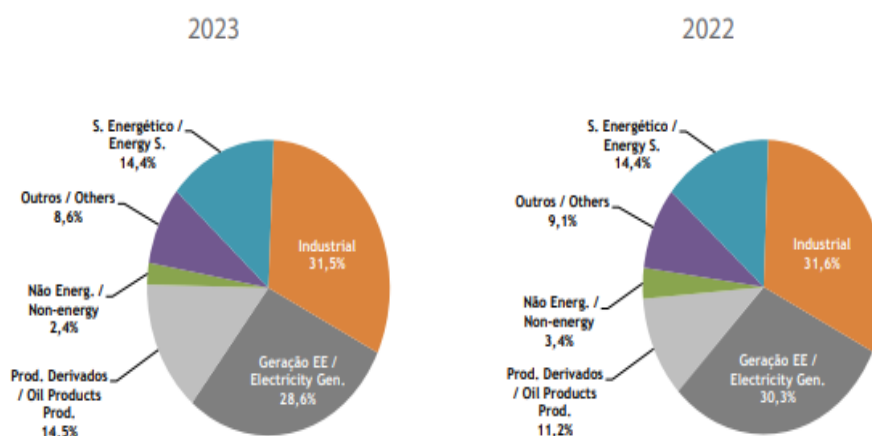
4.1.2 Gás Natural

O gás natural, ou GN, é uma substância geralmente encontrada próxima à jazidas de petróleo, composta pela mistura de hidrocarbonetos leves e com um poder calorífico de 9400 kcal/m³, permanecendo em estado gasoso na atmosfera ambiente, sendo predominante composto por metano (CH₄), muito relevante nas indústrias químicas, têxteis e cerâmicas (SANTOS et al., 2007)

Seu uso como combustível iniciou no século 19, vindo primariamente do carvão com a finalidade de atender a iluminação pública, porém, com a popularização da eletricidade, este passou a ser utilizado apenas no setor de cocção. Apenas em 1990 que o gás natural voltou a ser introduzido na matriz energética brasileira, por alguns fatores principais, entre eles, a descoberta do gás em bacias sedimentares de jazidas de gás, que estabeleceram uma infraestrutura e atraíram investimentos para tal; e uma maior integração econômica com o Mercosul, o que possibilitou a inauguração do Gasbol em 1999, um gasoduto entre o Brasil e a Bolívia que oferta essa fonte energética a preços moderados, tornando-o uma fonte energética de fácil acesso no Brasil.

Segundo o relatório da EPE 2024 (Figura 7), a maior parte do consumo (31.6%) atual do gás natural é para a indústria, atuando em diversos setores para diversas utilidades, desde o aquecimento de fornos de alta temperatura nas indústrias de cerâmica, na geração de vapor no setor têxtil, seguido pela geração de eletricidade e depois para a produção de derivados de petróleo.

Figura 7 - Consumo de Gás Natural no Brasil em 2023 e 2022

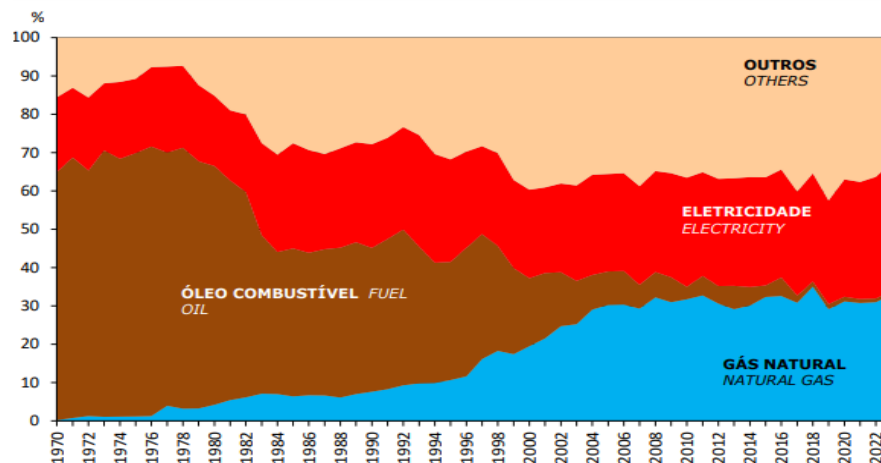


Fonte: BEN (2024)

Dentro da indústria química, o gás natural é uma das maiores fontes energéticas, representando um terço de toda energia utilizada na indústria, que também vêm substituindo o óleo combustível ao longo do tempo conforme pode ser verificado na Figura 8, que era a principal fonte energética deste setor da indústria. Os motivos para tal troca e predominância do gás natural são diversos: motivos

ambientais (ao emitir 33% menos CO₂ e menos poluentes - enxofres e nitratos), complexidade de logística muito menor com a construção dos gasodutos, aplicação mais simples (para o uso do óleo combustível este deveria ser aquecido antes de seu uso), além do alto custo de manutenção e armazenamento específico para equipamentos à óleo combustível.

Figura 8 – Estrutura do Consumo Energético no Setor Químico

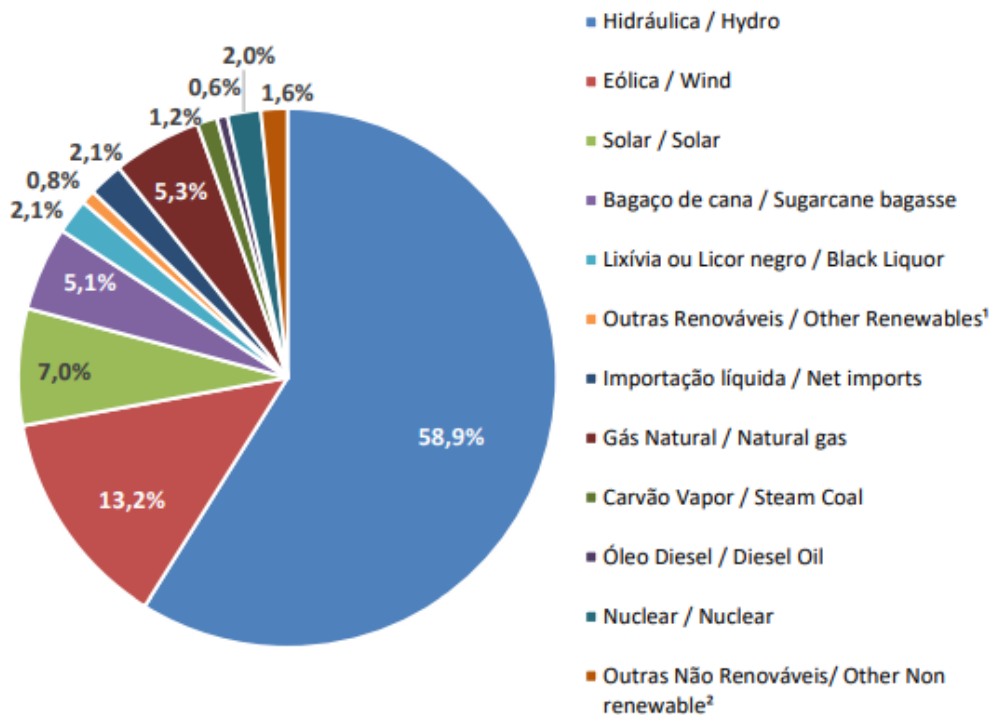


Fonte: BEN (2024)

4.1.3 Elétrica

A energia elétrica consolida-se como a segunda maior fonte energética industrial brasileira. Principalmente composta por fontes renováveis, isto é, advindas de recursos naturais que regeneram na natureza, o Brasil é destaque perante outros países em desenvolvimento, com grande predominância das energias hidráulicas, eólica e solar (Figura 9), que representam maioria dentre o ofertado. Contudo, cabe ressaltar a também participação significativa de gás natural como fonte não renovável, sendo um grande participante como combustível nas gerações termelétricas, principalmente em crises hídricas, onde apenas as usinas hidroelétricas não conseguem atender à demanda sozinhas.

Figura 9 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte



Notas / Notes:

1. Inclui Lenha, Biodiesel e Outras renováveis / Includes Firewood, Biodiesel and Other Renewables

2. Inclui Óleo Combustível, Gás de Coqueria, Outras Secundárias e Outras Não-Renováveis / Includes Fuel Oil, Coke Oven Gas, Other Secondaries and Other Non-Renewables

Fonte: BEN (2024)

No contexto industrial, a aplicação da energia elétrica ocorre de forma diversificada. Enquanto parte de seu uso é muito utilizada para transformar a energia elétrica em força motriz ou iluminação, setores específicos apresentam demandas eletrointensivas caracterizadas pelo consumo elevado e direto nos processos produtivos. É o caso da siderurgia, metalurgia e produção de alumínio, atividades que respondem por parcela considerável do consumo industrial total.

A análise detalhada de cada fonte energética relevante permitirá compreender melhor sobre como essa composição se estabeleceu e quais perspectivas se apresentam para o futuro da indústria nacional.

4.1.3.1 Hidrelétrica

O Brasil é o segundo país que mais produz energia elétrica por meio de hidrelétricas no mundo, produzindo mais de 425 TWh em 2023 (BEN 2024), onde,

como apontado pela Tabela 1, as principais regiões geradoras são o Sul, Norte e Sudeste, com destaque dos estados do Paraná, Pará, Minas Gerais e São Paulo, sendo responsáveis por mais de 57% de toda produção de energia elétrica advinda de hidrelétricas.

Tabela 1 - Estados com maior geração hidráulica em 2023

Estado	Geração Hidráulica (TWh)
Paraná	88,28
Pará	64,01
Minas Gerais	47,19
São Paulo	44,30

Fonte: BEN (2024)

O funcionamento dela se dá pela conversão da energia da água em movimento em eletricidade por meio de turbinas. Onde o processo de construção da usina começa pelo represamento de um rio, formando um reservatório de água em altura elevada. Quando as comportas de contenção da água são abertas, a água desce por tubulações com alta pressão, atingindo as pás de turbinas na base da hidrelétrica, girando-as e transferindo a energia mecânica da vazão de água para um gerador que transforma a energia em eletricidade, que é transportada a um transformador que ajusta a voltagem para a transmissão de rede elétrica até os consumidores finais, com a água retornando ao curso do rio após a turbina. Assim, os estados com maior presença de hidrelétricas são aqueles com grandes desníveis de água e rios com grande vazão, como o estado do Paraná com a Usina de Itaipu, que aproveita as quedas do planalto estadual, gerando 76,4 TWh em 2023.

Apesar de gerarem energia de maneira renovável e sem resíduos ou poluentes, há vários pontos de discussão sobre o uso de hidrelétricas, sendo o principal a questão social, já que, para a construção dessas usinas, é necessária uma grande área para o represamento e, inevitavelmente há a necessidade de desapropriação de terras de populações nativas (ZHOURI; OLIVEIRA, 2007), além de causar a perda da fauna e flora local que será inundada (ROSA, L. P., 2007). Outro ponto é sobre a

instabilidade climática, onde as secas de 2012 a 2015 no Sudeste e Centro-Oeste reduziram a capacidade dos observatórios para 23% (ONS,2015), forçando a ativação de termelétricas fósseis, aumentando as tarifas elétricas em 50% (ANEEL,2016), o que pode causar prejuízo em indústrias que dependam da malha elétrica.

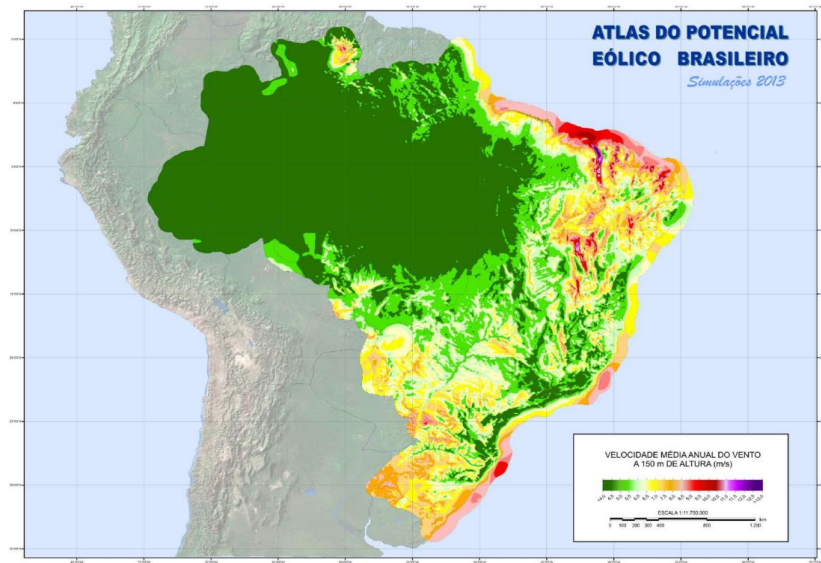
4.1.3.2 Eólica

Sendo a segunda maior fonte de energia elétrica, produzindo 95,80 TWh em 2023, a energia eólica parte do princípio de que, como o ar é um fluido, possuindo massa, e se desloca como vento, o trabalho exercido por este ao se deslocar pode ser utilizado para transformar sua energia cinética em energia elétrica por meio de turbinas.

Sua transformação em energia se dá por meio de turbinas eólicas, grandes equipamentos, que vão de 80 a 120 metros de altura, onde o vento bate nas pás, rotacionando-as e transformando a energia cinética em mecânica para uma turbina geradora que transforma a energia mecânica em eletricidade.

Após o investimento no desenvolvimento das fontes renováveis no Brasil, a energia eólica expandiu principalmente na região Nordeste, pela abundância de ventos em alta velocidade (Figura 10), tanto que, em 2015 mostrou-se que apenas esta região possui 80% da potência eólica instalada de todo o país, isto é, 6.888 MW apenas no Nordeste de um total de 8.715 MW (LIMA; SANTOS; MOIZINHO, 2018).

Figura 10 - Velocidade Média do Vento a 150m de Altura



Fonte: CEPEL (2017)

A Figura 11 ilustra a distribuição dos parques eólicos pelo território nacional em 2017, indicando tanto o número de usinas instaladas quanto seu potencial de geração de energia elétrica. Boa parte desse potencial se dá por diferentes fatores, como: rugosidade do terreno, massa específica do ar e principalmente pela velocidade do vento, assim, as regiões com maior foco de parques eólicos são no Nordeste e Sul (CEPEL, 2017).

Figura 11 - Parques Eólicos no Brasil e Produções



Fonte: CEPEL via Site da ABEEÓLICA (2017)¹

Além do uso residencial, globalmente, o uso da energia eólica tem-se popularizado na indústria do aço para descarbonizar sua produção, a principal motivação para tal é a de reduzir a quantidade de combustíveis fósseis usados e CO₂ gerado por tonelada de aço. A multinacional Tenaris construiu em 2024 um parque eólico para alimentar seu Centro Industrial em Campana, Argentina, planejando atender à metade de sua demanda elétrica e com o plano de reduzir 30% do CO₂ emitido por tonelada de aço até 2030. Já no Brasil, a ArcelorMittal em uma Joint Venture junto da Casa dos Ventos planejam a finalização em 2030 do projeto do complexo Eólico Babilônia Centro, localizado na Bahia, que produzirá mais de 30 GW de energia elétrica, para atender aproximadamente 40% do consumo nacional elétrico da ArcelorMittal e também da população próxima ao parque.

Graças ao programa do BNDES em 2004, criando apoio financeiro a fontes alternativas de energia elétrica, principalmente eólica e solar, cerca de 57,5% do total da capacidade eólica instalada no Brasil vem de projetos financiados pelo banco, incluindo este do Babilônia Centro.

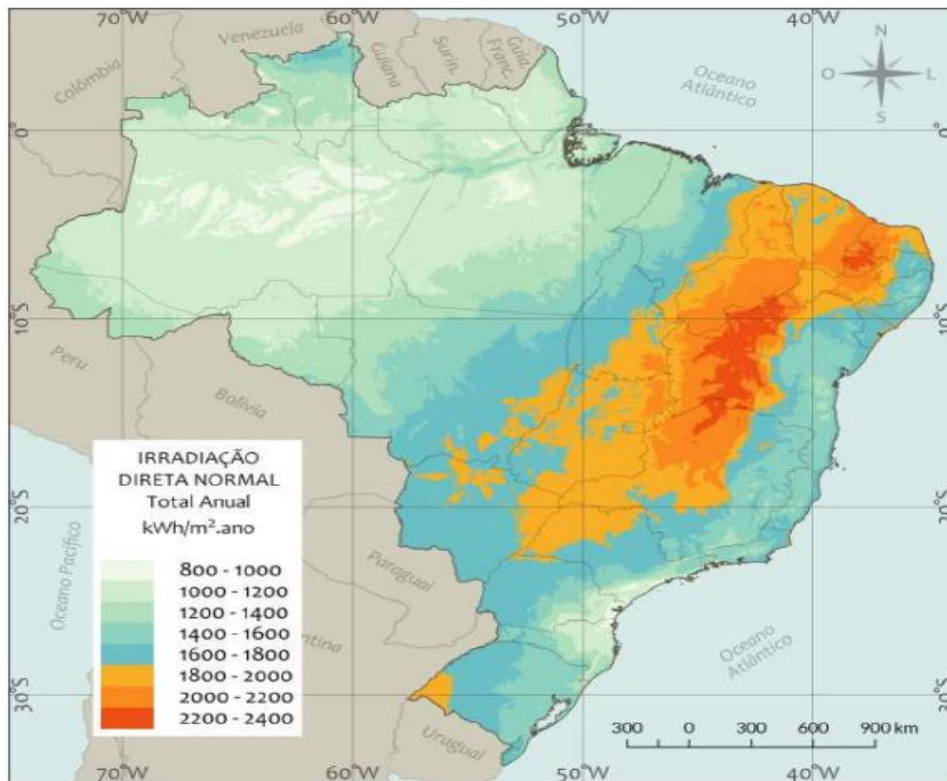
¹ Disponível em <https://abeeolica.org.br/energia-eolica-chega-a-setima-posicao-no-ranking-mundial-de-geracao-abastecendo-10-do-brasil/> . Acesso em 14 Abril 2025

4.1.3.3 Solar

A energia solar é a terceira maior fonte de energia elétrica brasileira, representando 7,0% de toda oferta interna de energia elétrica. Representa a energia que mais cresceu no quesito de produção de 2014 a 2023, crescendo em mais de 10 vezes, muito por conta de incentivos por ações regulatórias, como a que estabelece a “venda” de energia elétrica excedida para a malha elétrica. O incentivo às micro e minigerações mostrou resultados expressivos em 2023: a energia solar fotovoltaica respondeu por 29.813 GWh dos 30.950 GWh totais produzidos por esses sistemas, representando 96,3% de toda a geração distribuída no país.

A energia solar fotovoltaica opera por meio da conversão direta da luz solar em eletricidade. Esse processo de conversão ocorre quando os fótons da luz solar incidem sobre as células fotovoltaicas, compostas principalmente de silício que, ao serem absorvidos, esses fótons energizam os elétrons do material semicondutor assim fazendo com que se desloquem através das diferentes camadas da placa fotovoltaica em que esse movimento de elétrons gera uma corrente elétrica contínua, que é então convertida para uso em sistemas elétricos. Sendo assim, o processo de conversão é mais eficiente em locais com alta incidência solar, como mostra a distribuição de irradiação solar direta no Brasil pela Figura 12.

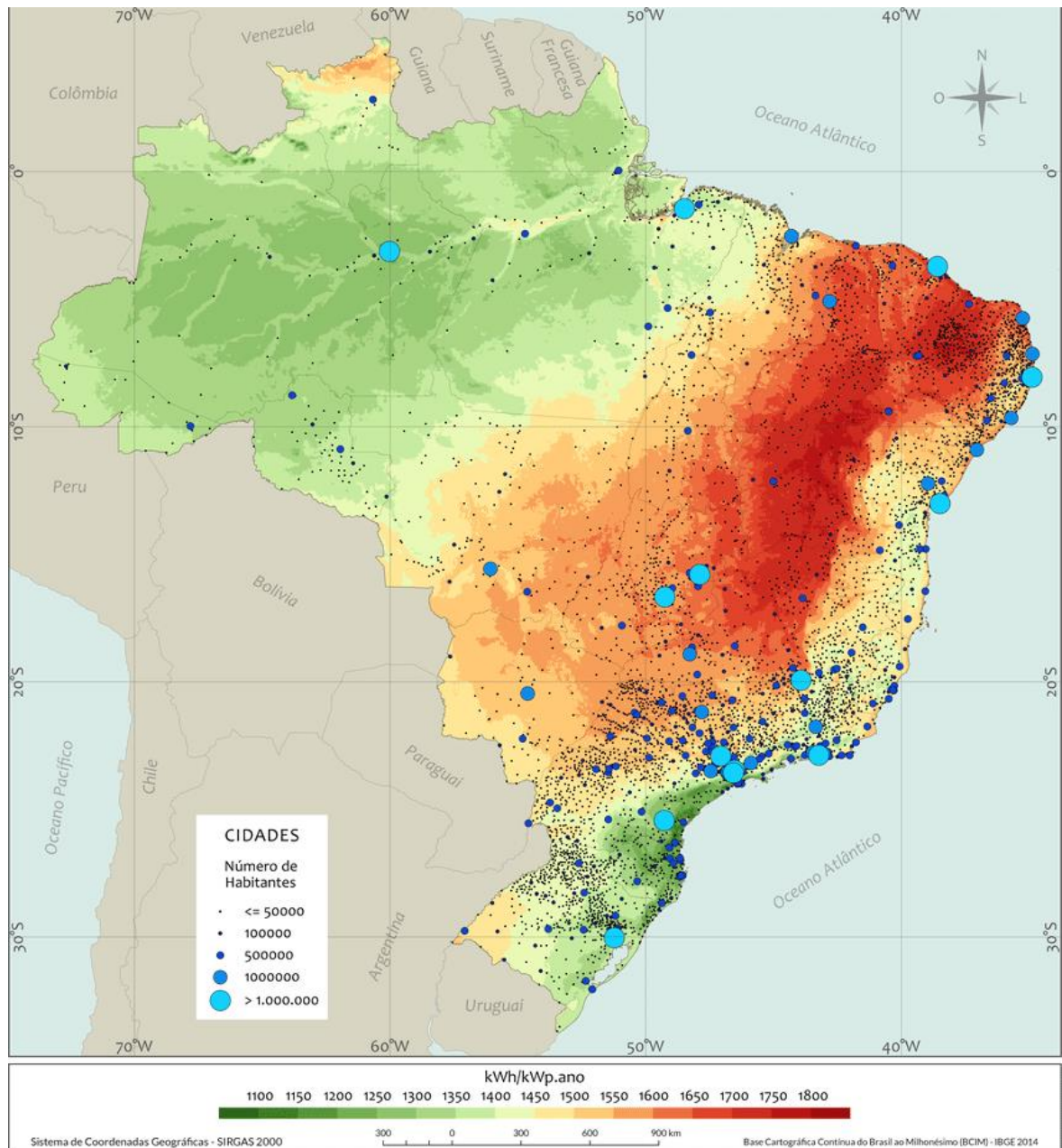
Figura 12 - Mapa Brasileiro de Irradiação solar direta



Fonte: Adaptado de PEREIRA et al. (2017)

Sendo assim, o potencial de geração de energia solar está intrinsecamente ligado à incidência de radiação solar em cada região, onde áreas com maior intensidade e duração de insolação apresentam condições ideais para a instalação de parques fotovoltaicos, resultando em maior eficiência energética. A Figura 13 detalha o mapa potencial de geração de energia solar fotovoltaica no Brasil, o que permite correlacionar o potencial de geração energética com a irradiação solar da Figura 12. Assim, essa distribuição natural de recursos solares explica a concentração de investimentos em determinadas regiões do país, no Nordeste, centro do país e em partes no Norte do Sudeste, onde os níveis de irradiação são consistentemente elevados ao longo do ano.

Figura 13 - Potencial de Geração de energia solar fotovoltaica



Fonte: Adaptado de PEREIRA et al. (2017)

Justamente, segundo a ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica), os maiores estados produtores de energia solar estão localizados em Minas Gerais e São Paulo, principalmente por meio de microgerações, enquanto há também grande geração de energia no nordeste da Bahia até o Rio Grande do Norte, mas por meio de Clusters e Centros de geração de energia solar.

Em 2023, a energia solar fotovoltaica foi responsável por mais de 50,6 TWh de energia elétrica produzida, e, justamente por conta das previamente mencionadas legislações de incentivo e ações regulatórias, este número tende a crescer,

principalmente em áreas com inconstância elétrica.

4.1.4 Discussão

A análise desenvolvida neste capítulo indicou a dinâmica de transformação da matriz energética industrial brasileira ao longo das últimas cinco décadas. Constatase que a evolução do perfil energético vem sendo marcada por diversos pontos decisivos, desde a gradativa substituição de fontes tradicionais (lenha e óleo combustível) por alternativas mais eficientes seguido da incorporação estratégica do gás natural como elemento de transição energética junto do aumento da participação de fontes renováveis, particularmente biomassa, em resposta às pressões ambientais e econômicas.

As informações analisadas revelaram que essa transformação não ocorreu de forma linear, mas sim em resposta a choques externos (como as crises do petróleo) e a políticas públicas como o Gasbol e os incentivos à energia solar e eólica. Particularmente significativo foi o papel do gás natural, que emergiu como solução intermediária entre fontes fósseis poluentes e renováveis ainda em consolidação, demonstrando sua importância na redução de emissões sem comprometer a competitividade industrial.

Contudo, os desafios identificados, como a dependência de importações, a sazonalidade de algumas fontes renováveis e a necessidade de modernização infraestrutural, indicam que a consolidação de uma matriz industrial plenamente sustentável ainda requer ações coordenadas entre setor público e privado. Os aprendizados desta análise sugerem que a próxima fase da matriz energética industrial brasileira deverá equilibrar três dimensões fundamentais: segurança no abastecimento, viabilidade econômica e compromissos ambientais, em um contexto de crescente complexidade tecnológica e regulatória sendo garantidos pelo governo.

4.2 A MATRIZ ENERGÉTICA GLOBAL

De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), o setor industrial responde por 37% do consumo energético global, registrando crescimento de 3% em relação a 2002. Esse cenário evidencia uma forte dependência de

combustíveis fósseis, que representam mais de 65% da matriz industrial, enquanto as fontes elétricas contribuem com menos de 23%. O carvão lidera o consumo (47 EJ), seguido pelo petróleo (32,3 EJ) e gás natural (29,8 EJ), enquanto bioenergia e calor somam 11,9 EJ e 7,3 EJ, respectivamente. Essa composição revela os desafios globais para a descarbonização, especialmente em setores intensivos como o siderúrgico, onde o carvão responde por mais de 75% da demanda energética.

Tabela 2 - Consumo Energético Global por Fonte

Energia	Consumo (EJ)
Carvão	47,0
Petróleo	32,3
Gás Natural	29,8
Eletricidade	37,8
Calor	7,3
Bioenergia	11,9

Fonte: IEA (2022)

As disparidades regionais acentuam a complexidade dessa transição ao redor do globo. Na Europa, a dependência de gás natural e petróleo, sendo muito supridos pela Rússia, tornou-se um problema estratégico após a crise geopolítica com a Ucrânia (2021), com a Rússia sendo a maior fornecedora de gás natural, produzindo 16% de todo gás natural global (ALI et al., 2023) que elevou o preço do gás natural em 180% nas primeiras duas semanas após o início do conflito (Adolfson et al., 2022) e assim expondo vulnerabilidades na segurança energética principalmente na Europa. Na Ásia, o carvão e o petróleo ainda dominam a matriz, embora haja esforços graduais para diversificação, enquanto o Oriente Médio mantém alto consumo de derivados de petróleo devido à sua abundância local. Já a África apresenta perfil distinto, com biocombustíveis (como madeira) representando 30% da geração energética, embora fontes fósseis ainda sejam significativas.

Nesse contexto, acordos internacionais como o Tratado de Kyoto e o Acordo

de Paris têm impulsionado a busca por alternativas sustentáveis. Para o Brasil, essa agenda representa dupla oportunidade: além de modernizar sua própria matriz industrial com destaque para a bioenergia e fontes renováveis, o país pode posicionar-se como fornecedor de tecnologias e combustíveis renováveis para outras regiões. No entanto, a transição global exigirá superar desafios estruturais, como a redução da dependência de fósseis em setores energético-dependentes e o desenvolvimento de infraestruturas para energias limpas, equilibrando competitividade industrial e metas climáticas.

4.3 TENDÊNCIAS NO MUNDO E POSSIBILIDADES NO BRASIL

Diante deste panorama global da matriz energética global, torna-se relevante investigar as tecnologias e soluções energéticas que vêm sendo implementadas em outros países, sendo suas situações políticas, geográficas e socioeconômicas similares ou não ao Brasil. Além disso, serão destacadas as tecnologias que já estão em fase de implementação no país, avaliando seus impactos e perspectivas de escalonamento.

Essa análise busca identificar oportunidades para a modernização da matriz industrial brasileira, considerando tanto a adaptação de soluções estrangeiras quanto o fortalecimento de iniciativas locais. O objetivo é apontar caminhos viáveis para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, aumentar a eficiência energética e alinhar o desenvolvimento industrial às metas de sustentabilidade, sem comprometer a competitividade do setor. A seguir, serão exploradas algumas tecnologias e suas possíveis aplicações no Brasil, destacando casos concretos e lições aprendidas que podem inspirar políticas públicas e investimentos privados no setor energético-industrial nacional.

4.3.1.1 Biogás

O biogás é um gás produzido por meio da digestão anaeróbica advinda de diversas fontes, desde resíduos agrícolas até efluentes industriais, onde é processada em biodigestores, que tem como produto biogás e biofertilizante, sendo o primeiro rico em CH₄ (55-65%), contendo também de 30 a 40% de dióxido de carbono (CO₂) e outras impurezas, como sulfeto de hidrogênio (H₂S) e Siloxanos (ZHANG et al., 2021).

Este pode ser utilizado como um substituto do gás natural fóssil, sendo usado diretamente na queima e também para a geração de energia elétrica.

Nos Estados Unidos, as maiores produções agronômicas são de milho, soja, cevada e aveia, sendo este o maior produtor de etanol do mundo, junto do Brasil somando cerca de 80% da produção global de etanol (ALVES, 2024), com a diferença seu etanol ser derivado do milho e não da cana. Apesar do milho possuir a sua palha, que poderia ser uma alternativa para queima, os Estados Unidos usam em sua maior parte gás natural para atender a demanda energética das usinas.

Essa escolha está diretamente relacionada à abundância de reservas domésticas e extensa infraestrutura de gasodutos já consolidada no país, que garante custo competitivo e suprimento estável para a indústria nacional. Em contraste, a utilização de biomassa para queima, como no caso do bagaço de cana no Brasil, apresenta viabilidade econômica apenas em contextos específicos, onde já existem processos industriais integrados e escala suficiente para justificar os investimentos em caldeiras e equipamentos especializados. Enquanto os americanos aproveitam sua vantagem geológica em combustíveis fósseis, os brasileiros capitalizam seus recursos renováveis, porém com limitações logísticas que restringem sua aplicação a regiões próximas das fontes de matéria-prima. Essa divergência de abordagens reflete as particularidades de cada matriz energética nacional, demonstrando como fatores locais de disponibilidade de recursos e infraestrutura existente determinam as escolhas tecnológicas e os modelos de desenvolvimento energético adotados por cada país.

Ademais, os EUA estão investindo em alternativas de deixar sua produção de etanol mais verde por meio da introdução de biogás. a Chippewa Valley Ethanol Co., cooperativa americana está expandindo sua produção de etanol de 45MMgy para 85MMgy, onde parte dessa transformação virá de queimadores de biomassa a partir de rejeitos de madeira, queimando de 55 a 70 toneladas de biomassa em um dia, misturando o syngas obtido com gás natural para alimentar cerca de 25% da alimentação de produção de etanol (W. KRAM, 2007), e também há estudos sobre o uso da queima de palha e restos de milho para alimentar caldeiras de aquecimento de processo, garantindo não só economia energética mas também sequestro de carbono.

No Brasil, o uso do biogás vem ganhando espaço, impulsionado por iniciativas como a recente produção de caminhões movidos a gás, iniciada em 2020, que usam

biometano e GNV como combustíveis. Além disso, o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás bruto no mesmo ano poderia corresponder a 35,4% do consumo energético nacional (Milanez, Maia,Guimarães,2021).

O Brasil já conta com diversas usinas de aproveitamento de biogás, voltadas para a geração de energia elétrica, produção de biometano e geração de calor para processos e utilidades, um exemplo é a Usina de Biogás da Piracanjuba, localizada em Bela Vista de Goiás, citada no documento do PROBIOGAS (BRASIL, 2017), desenvolvido pelo Ministério das Cidades. Essa usina utiliza o calor proveniente do tratamento de efluentes da produção de laticínios, com uma potência instalada de 8,7 MI kcal/h na geração de vapor.

Também de acordo com Milanez, Maia e Guimarães (2021), os maiores potenciais de geração de eletricidade a partir de resíduos orgânicos no Brasil estão associados à vinhaça, subproduto da cana-de-açúcar, responsável por 72,8% do total, e aos aterros sanitários, que representam 23,6% do potencial nacional, portanto, é uma energia com muito potencial a ser explorado e que pode se beneficiar das infraestruturas já existentes de gás natural.

4.3.1.2 Hidrogênio verde

O gás hidrogênio (H₂) emerge como uma fonte energética e matéria-prima industrial de grande relevância, com aplicações estratégicas em diversos setores, desde transporte, geração de energia e principalmente em processos industriais de alto consumo energético. Sua importância crescente decorre de características únicas: quando utilizado como combustível, emite apenas água como subproduto, apresentando assim um potencial significativo para a descarbonização de setores industriais tradicionalmente dependentes de combustíveis fósseis (NÓBREGA,2022). A produção de hidrogênio é realizada por meio de diversos processos e advém de várias fontes, sendo classificado principalmente pelo método produtivo e a matriz energética utilizada. O hidrogênio verde, a ser abordado neste item, é considerado a forma mais sustentável e é obtido por meio da eletrólise da água, utilizando eletricidade proveniente exclusivamente de fontes renováveis, como energia eólica, solar e hidrelétrica, contrastando do hidrogênio cinza, produzido por reforma a vapor do gás natural e do hidrogênio marrom, derivado da gaseificação do carvão mineral (ANTÔNIO, 2024).

Do ponto de vista econômico, o hidrogênio verde apresentava em 2021 um custo médio entre U\$6/quilo e U\$9/quilo, com expectativas de, com todo o incentivo global atingir U\$1,30 em 2030, feito possível principalmente em países com abundância de recursos renováveis, algo particularmente favorável ao Brasil. Tal redução no custo é possível devido ao fato de que cerca de 70% dos custos de produção do hidrogênio verde estão diretamente associados aos custos da energia elétrica e sua disponibilidade (NÓBREGA,2022). O Brasil tem demonstrado um histórico de engajamento ativo nas discussões internacionais sobre o hidrogênio, participando de iniciativas como a Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia (IPHE) e coliderando em 2021 o Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia, onde apresentou pautas e compromissos específicos para o desenvolvimento da indústria de hidrogênio no país (ANTÔNIO, 2024).

Apesar do potencial evidente, o hidrogênio verde ainda enfrenta desafios significativos para sua adoção em larga escala. Seu custo atual é duas a três vezes superior ao do hidrogênio azul (produzido a partir de gás natural com captura de carbono), e questões técnicas relacionadas ao armazenamento e transporte permanecem como obstáculos importantes devido à alta volatilidade e inflamabilidade do gás. Contudo, soluções inovadoras estão sendo desenvolvidas, como a utilização de tubulações existentes de gás natural para transporte de hidrogênio diluído, alternativa que apresenta potencial para transmitir energia com eficiência dez vezes superior às linhas elétricas tradicionais a aproximadamente um oitavo do custo (ANTÔNIO, 2024).

No contexto industrial brasileiro, um setor promissor para a aplicação direta do hidrogênio verde é o de mineração de ferro, que representou 19% da produção mundial de ferro em 2022. Como destaca Robson Lage Figueiredo, Silva, Énrique (2023), este setor tradicionalmente depende intensamente de combustíveis fósseis, com enfoque no óleo diesel, o que resulta em altas emissões de dióxido de carbono e outros poluentes, mas vem investigando a viabilidade técnica e econômica da mistura de hidrogênio verde com óleo diesel, como uma possível estratégia de transição energética.

A produção global de hidrogênio em 2024 foi estimada em torno de 70 milhões de toneladas, sendo produzidas principalmente a partir de gás natural (70%) e carvão (7%), mas tem experimentado crescimento na produção de hidrogênio verde pelos últimos anos, principalmente por iniciativas globais como o Acordo de Paris, que tem

o compromisso de limitar o aumento da temperatura global entre 1,4°C e 2°C nos próximos anos por meio da redução de emissões de gases nocivos à atmosfera. Sendo importante ressaltar que, a aplicação do hidrogênio como fonte energética industrial ainda é limitada, representando apenas 6% do consumo total, enquanto a maior parte deste se destina a processos químicos industriais, como a síntese de metanol, amônia e participando de processos siderúrgicos e em operações de refino do petróleo (ANTÔNIO,2024).

4.3.1.3 Solar térmico

A energia solar térmica consiste na conversão da radiação solar em energia térmica, sendo usada para o aquecimento de água e geração de vapor. Embora seu uso seja tradicionalmente associado aos setores residencial e comercial, estudos demonstram seu potencial para aplicações industriais (JUNIOR; SACOMANO; NETO, 2014), sendo que os setores industriais mais promissores para a aplicação seriam o Químico, de Alimentos e Bebidas, nas etapas de Pré-aquecimento de água, Lavagem, Esterilização e Pasteurização, já existindo estudos que comprovam sua eficiência técnica, econômica e ambiental para aquecimentos em processos no setor de laticínios, como demonstrado por GUIMARÃES et al. (2022).

Conforme os dados do Programa de Colaboração em Tecnologia de Aquecimento e Refrigeração Solar da Agência Internacional de Energia (IEA SHC TCP), cerca de 30% de toda demanda industrial de calor vem de temperaturas abaixo de 100°C, e quase 60% requerem temperaturas abaixo de 400°C, favorecendo os setores industriais de alimentos, tratamentos de polímeros, metais e processos de limpeza, secagem, evaporação e destilação.

Enquanto apenas a incidência direta dos raios solares podem não ser o suficiente para atingir a energia necessária para aquecer utilidades ou outras finalidades (seja via vapor ou aquecimento direto da água), há tecnologias como concentradores parabólicos que redirecionam os raios solares, concentrando de 30 a 1000 vezes a radiação solar, chamadas de plantas CSP (*Concentrated Solar Power*), que poderiam atender à cogeração em grandes processos químicos que precisam de calor, também com o uso dessa energia durante a noite por meio de sistemas de armazenamento térmico (*Sensible Heat Storage*) por meio de fluidos sintéticos, sais fundidos (nitrato de potássio) ou reações químicas (MARTÍN,2022).

Contudo, análises comparativas com países de similar incidência solar, como a Tunísia, sugerem cautela sobre o tipo de investimento nessa tecnologia em fins industriais, apontando que, embora seja tecnicamente viável como um complemento energético, a implementação da energia solar térmica no setor industrial ainda enfrenta desafios econômicos em relação à subsídios e logísticos que merecem avaliação criteriosa (CALDERONI et al., 2012).

4.3.1.4 Geotermia

A energia geotérmica é o uso do calor oriundo do interior da terra, como fonte energética, seja para geração de energia elétrica ou para aquecimento direto de utilidades ou produtos. Essa fonte energética é classificada em três categorias de acordo com sua temperatura e possíveis aplicações:

1. Baixa entalpia (50°C a 150°C): utiliza a água subterrânea para aquecimento direto em sistemas industriais ou residenciais;
2. Alta entalpia (150°C a 300°C): emprega vapor de água para acionamento de turbinas e geração de energia elétrica;
3. Sistemas de rochas secas e quentes (*hot dry rock - HDR*) - (50°C a 300°C): aproveita o calor de formações rochosas através da injeção de água para produção de vapor ou água aquecida, com o posterior uso destes.

Segundo Rabelo et al. (2002), a temperatura ideal para aplicação industrial está entre 35°C e 148°C. Ainda que o país não possua capacidade para a implementação de grandes usinas geotérmicas, as regiões brasileiras com maior potencial geotérmico incluem a Bacia do São Francisco, Triângulo Mineiro e áreas específicas das regiões Sul e Sudeste (ARBOIT, 2013), onde os recursos disponíveis são predominantes de baixa entalpia, que podem atuar nos setores de climatização residencial, atividades agroindustriais e, principalmente, processos industriais que demandam aquecimento. Rabelo (2002) aponta que o uso já é realidade nas cidades de Cornélio Procópio (PR), que utiliza águas subterrâneas a temperaturas de 50°C para aquecimento de caldeiras, e Taubaté (SP) que utiliza águas em temperaturas similares para o processamento industrial de madeira.

Estima-se que o Brasil possua um potencial geotérmico explorável equivalente a 50 bilhões de toneladas de petróleo (RABELO et al., 2002), representando uma alternativa energética relevante para atender demandas locais específicas,

particularmente em aplicações industriais que requerem suprimento contínuo de calor para baixas entalpias

4.3.1.5 *Pellet* energético de biomassa

No setor energético, um *pellet* é um aglomerado cilíndrico e denso em energia advinda de biomassa, sendo feito principalmente de madeira e serragem, mas com possibilidade de outras biomassas com menos densidade, como sorgo e bagaço de cana, sendo tecnicamente equivalentes aos briquetes, ou “carvões ecológicos”.

Já são usados por países de clima temperado como Canadá e EUA, sendo principalmente consumidos pela Europa, que só em 2007 totalizaram 7 milhões de toneladas, utilizando a maior parte dessa energia para aquecimento residencial ou em termelétricas [SERRANO, 2009].

A figura 13 ilustra um *pellet* produzido a partir do bagaço de cana, demonstrando a fisionomia desta fonte alternativa

Figura 14 - *Pellet* de Bagaço de Cana



Fonte: Autoria Própria

O panorama global sofreu significativas mudanças após 2007 com o crescimento de mercado na compra e produção de pellets no continente asiático, principalmente pela China, Coreia do Sul e Japão, com foco no último, que após o acidente nuclear de Fukushima, aliado ao tratado de Kyoto, focou em investir na

diversificação energética, sendo que a maior parte do consumo não é para uso doméstico, mas sim geração de energia.

Estudos técnicos demonstram a viabilidade desses biocombustíveis para aplicações mais complexas. Wang et al. (2015) comprova a possibilidade de substituição parcial do carvão mineral por *pellets* na metalurgia, ampliando as possibilidades de uso para além das aplicações térmicas usuais em residências e geração energética.

No contexto brasileiro, RASGA (2013) aponta que o Brasil carece de infraestrutura logística ou investimentos que viabilizem por completo as florestas energéticas, isto é, plantio de árvores com a única finalidade de produzir *pellets* de madeira. Contudo, apresenta condições favoráveis para a produção de *pellets* a partir de serragem, bagaços de cana, principalmente para atender demandas isoladas no país e para exportação para outros países em insegurança energética.

4.3.2 Discussão

A análise das tendências energéticas globais e das experiências internacionais revela diferentes perfis no setor industrial com importantes lições para o Brasil. A pesquisa demonstra que a transição energética geral e na indústria global não segue um modelo único, mas deve ser adaptada às particularidades de cada país, considerando sua matriz de recursos naturais, políticas vigentes, infraestrutura existente e características do parque industrial.

No contexto brasileiro, três vetores emergem como fundamentais para a modernização da matriz energética industrial: a complementaridade tecnológica, a integração entre setores e a valorização dos recursos regionais. O exemplo do biogás e syngas nos EUA mostra como soluções energéticas podem ser adaptadas às cadeias produtivas locais, enquanto o uso solar térmico destaca a importância de alinhar as tecnologias às demandas específicas de cada segmento industrial, sendo utilizado em utilidades de processos.

O potencial do hidrogênio verde para a siderurgia nacional merece atenção especial. Como demonstrado, o Brasil possui vantagens comparativas significativas para sua produção, dada sua matriz elétrica renovável. Contudo, os desafios de custo e infraestrutura exigem uma estratégia gradual enquanto se desenvolvem soluções para armazenamento e transporte em larga escala.

A energia solar térmica e a geotermia apresentam oportunidades locais complementares, particularmente para indústrias com demandas específicas de calor em baixas e médias temperaturas. O caso de Taubaté e Cornélio Procópio comprova a viabilidade técnica dessas soluções em contextos locais, sugerindo que políticas de fomento regionalizadas poderiam potencializar seu aproveitamento, de maneira similar às usinas de autogeração de energia solar.

Quanto aos pellets energéticos, o Brasil possui matéria-prima abundante por meio do bagaço de cana, outros resíduos agrícolas e principalmente resíduos madeiros como a serragem, que além de desenvolver o mercado e indústria internos, gera valor para um novo produto com demanda para exportação. A experiência europeia e asiática indica que esta pode ser uma via para agregar valor aos resíduos agrícolas, desde que superados os desafios logísticos.

Finalmente, as grandes extensões territoriais do Brasil, alinhado à sua diferença climática e geográfica pontuam que seria muito difícil que este país tenha uma matriz energética única e consolidada, mas sim uma matriz mais fragmentada, onde as fontes a gerarem a energia são aquelas que mais fazem sentido para a região, seja esta alguma com maior incidência de raios solares, com mais comum plantio de cana-de-açúcar ou com investimentos regionais para alguma nova fonte energética como o hidrogênio verde.

5. CONCLUSÃO

A matriz energética industrial brasileira possui diversas vantagens competitivas por possuir grande participação de fontes renováveis, tanto diretamente na matriz energética industrial quanto indiretamente na geração de energia elétrica, porém, esta ainda pode se demonstrar dependente da sazonalidade hídrica e dependência regional, exigindo ações estratégicas para uma melhor evolução energética sustentável, o que também implica que, a fonte energética que é utilizada em algum estado, pode não ser a melhor para o país inteiro, graças às suas especificidades, como no caso da geotermia, energia solar e eólica.

Ademais, o potencial de bioenergia, aliado ao crescimento das fontes eólica e solar, posiciona o Brasil como referência na conciliação entre desenvolvimento industrial e sustentabilidade. No cenário global, tecnologias como hidrogênio verde, biogás e pellets energéticos apresentam oportunidades dentro do cenário atual

brasileiro, mas sua implementação requer avaliações políticas, econômicas e logísticas adaptadas às particularidades nacionais e regionais, o que já demonstrou ser feito com ajuda do governo por meio de políticas públicas, desde a expansão do gás natural na indústria por meio do GasBol e o recente crescimento da energia solar, maior representante nacional das micro gerações em solo nacional.

Portanto, entende-se o futuro da matriz energética industrial brasileira dependerá do maior aprofundamento de fontes renováveis já presentes no país, da inovação tecnológica delas e diversificação perante novas energias a serem pesquisadas nacionalmente, todos sendo aliados principalmente a políticas públicas articuladas que garantam a viabilidade de uso, por meio da logística, custo de uso e implementação. Dessa forma, o país pode liderar uma transição energética alinhada às demandas do século XXI por meio de cooperação entre governo, indústria e academia, respeitando as capacidades locais.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **Energia eólica chega à sétima posição no ranking mundial de geração abastecendo 10% do Brasil.** Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica-chega-a-setima-posicao-no-ranking-mundial-de-geracao-abastecendo-10-do-brasil/>>. Acesso em 14 Abril 2025

ABSOLAR - **Ranking da energia solar: veja estados com maior potência** -. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/ranking-da-energia-solar-veja-estados-com-maior-potencia/>>. Acesso em: 13 abril 2025.

ADOLFSEN, J. F. et al. **The impact of the war in Ukraine on euro area energy markets.** Economic Bulletin Boxes, v. 4, 2022.

AGÊNCIA GOV. **Com R\$ 3,2 bi do BNDES, projeto eólico na Bahia vai gerar energia para mais de 1 milhão de lares.** Brasília: EBC, 2024. Disponível em: <<https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202401/com-r-3-2-bi-do-bndes-projeto-eolico-na-bahia-vai-gerar-energia-para-mais-de-1-milhao-de-lares>>. Acesso em: 15 abril. 2025.

ALI, M. et al. **Russia-Ukraine war impacts on climate initiatives and sustainable development objectives in top European gas importers.** Environmental Science and Pollution Research International, 15 ago. 2023.

ALVES, ANA. **Etanol: 2 países são líderes mundiais em produção do**

biocombustível; 1 deles é o Brasil. Araçatuba, 23 sep 2024. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2024/09/23/etanol-2-paises-sao-lideres-mundiais-em-producao-do-biocombustivel-1-deles-e-o-brasil.html>. Acesso em: 10 abr 2025

ANTÔNIO, E. **HIDROGÊNIO, ENERGIA RENOVÁVEL: SUA UTILIZAÇÃO EM AMBIENTE INDUSTRIAL.** Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 10, n. 6, p. 3939–3950, 25 jun. 2024.

ARBOIT, N. K. S. et al. **POTENCIALIDADE DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA GEOTÉRMICA NO BRASIL – UMA REVISÃO DE LITERATURA.** Revista do Departamento de Geografia, v. 26, p. 155–168, 17 dez. 2013.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Projetos de referência: Programa Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Resíduos Sólidos - PROBIOGAS.** Brasília: Ministério das Cidades, fev 2017. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/FolhetoprojetosderreferenciaPROBIOGAS.pdf>. Acesso em: 06 Junho 2025.

CALDERONI, M. et al. **Solar Thermal Plants for Industrial Process Heat in Tunisia: Economic Feasibility Analysis and Ideas for a New Policy.** Energy Procedia, v. 30, p. 1390–1400, 2012.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – **CEPEL- Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013** / Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL – Rio de Janeiro: CEPEL, 2017.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v. 12, n. 4 abril 2025.

EDNALDO MICHELLON; ARACELLY, A.; ALVES, R. **BREVE DESCRIÇÃO DO PROÁLCOOL E PERSPECTIVAS FUTURAS PARA O ETANOL PRODUZIDO NO BRASIL.** RePEc: Research Papers in Economics, 1 jul. 2008.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021.** Rio de Janeiro: EPE, 2021. Seção 4.7: Regional: consumo e número de consumidores. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 31 mar 2025.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2024: Ano base 2023** / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2024

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Matriz Energética e Elétrica.**

Brasília: EPE, 2024 Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 31 mar. 2025.

GUIMARÃES, L. B. et al. **POTENCIAL DA ENERGIA SOLAR TÉRMICA E FOTOVOLTAICA NO SETOR DE LATICÍNIOS**. Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 16 ago. 2022.

IBGE. **Produção Agropecuária: Cana de açúcar, 2023** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/br>. Acesso em 28 maio 2025.

LIMA, E. C. DE; SANTOS, I. A.; MOIZINHO, L. C. S. **ENERGIA EÓLICA NO BRASIL: OPORTUNIDADES E LIMITAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**. Revista Estudo & Debate, v. 25, n. 1, 29 abr. 2018.

MARTÍN, M. **Challenges and opportunities of Solar thermal energy towards a sustainable chemical industry**. Computers & Chemical Engineering, v. 165, p. 107926, set. 2022.

MÁXIMO, WELLINGTON. **Entenda o programa Nova Indústria Brasil**. Brasília, 22 jan. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2024-01/entenda-o-programa-nova-industria-brasil>. Acesso em: 7 mai 2025

Melo, Isabela Esterminio de. **"As crises do petróleo e seus impactos sobre a inflação do Brasil**,PUC-RIO, 2008

MILANEZ, Artur Yabe; MAIA, Guilherme Baptista da Silva; GUIMARÃES, Diego Duque. **Biogás: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. [177]-213, mar. 2021.

RABELO, Jorge Luiz et al. **Aproveitamento da energia geotérmica do Sistema Aquífero Guarani: estudo de caso**. 2002, Anais.. [S.I.]: ABAS, 2002. Disponível em: <http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/22057/14417>. Acesso em: 03 maio 2025.

RASGA, Rodrigo Ottobrini Sucena. **Pellets de madeira e sua viabilidade econômico-financeira na substituição do óleo BPF-A1 em pequenos e médios consumidores no Estado de São Paulo**. 2013. 165 f. Dissertação (Mestrado em Economia) — Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2013.

ROBSON LAGE FIGUEIREDO; SILVA; ENRIQUE, C. **Importância do hidrogênio na indústria de mineração como fonte de energia renovável.** Journal of Environmental Analysis and Progress, v. 8, n. 4, p. 240–251, 19 out. 2023.

ROSA, L. P. **Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear.** Estudos Avançados, v. 21, p. 39–58, 1 abr. 2007.

SANTOS, E. M. DOS et al. **Gás natural: a construção de uma nova civilização.** Estudos Avançados, v. 21, p. 67–90, 1 abr. 2007.

SERRANO, Diego Machado Carrion. **Avaliação do potencial de produção e exportação de pellets combustível no polo florestal da região Sul do Brasil.** 2009. 90 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1610831>. Acesso em: 4 mai. 2025.

SILVA, Hídila Souza Teixeira da. **Estudo da queima de diferentes espécies do sorgo para geração de energia: simulação e análise econômica.** 2021. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2021.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. **Matriz energética brasileira: uma prospectiva.** Novos Estudos - CEBRAP, n. 79, p. 47–69, nov. 2007.

SILVA, Yuri Freitas Marcondes da et al. **Impactos do gasoduto Bolívia-Brasil: uma análise bibliométrica e qualitativa.** Revista Brasileira de Energia, v. 28, n. 1, p. 271-242, 2022 Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/668/501>. Acesso em: 16 jul. 2025.

WANG, C. et al. **Biomass as blast furnace injectant – Considering availability, pretreatment and deployment in the Swedish steel industry.** Energy Conversion and Management, v. 102, p. 217–226, set. 2015.

W. KRAM, J. **Shrinking Ethanol's Carbon Footprint.** Disponível em: <<https://ethanolproducer.com/articles/shrinking-ethanols-carbon-footprint-3092>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

ZHANG, Y. et al. **Economic assessment of biogas purification systems for removal of both H₂S and siloxane from biogas.** Renewable Energy, v. 168, p. 119–130, maio 2021.

ZHOURI, A.; OLIVEIRA, R. **Desenvolvimento, conflitos sociais e violência no Brasil rural: o caso das usinas hidrelétricas.** Ambiente & Sociedade, v. 10, p. 119–135, 1 dez. 2007.