



**Universidade de Brasília**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

**EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (PPG-CDS)**

**TESE DE DOUTORADO**

**CENÁRIOS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL 2040**

Paula Emília Oliveira Pimentel

Brasília-DF

Outubro/2023

Paula Emília Oliveira Pimentel

## **CENÁRIOS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL 2040**

Tese de Doutorado submetida ao Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília (CDS/UnB) como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Desenvolvimento Sustentável, área de concentração em Política e Gestão da Sustentabilidade.

**Orientador:** Professor Doutor Elimar Pinheiro do Nascimento (CDS/UnB)

**Coorientador:** Professor Doutor Antônio César Pinho Brasil Junior (FT/UnB)

Brasília-DF  
Outubro/2023

Ec           Emilia Oliveira Pimentel, Paula  
              Cenários para a Transição Energética no Brasil 2040 /  
Paula Emilia Oliveira Pimentel; orientador Elimar Pinheiro  
do Nascimento; co-orientador Antônio César Pinho Brasil  
Júnior. -- Brasília, 2023.  
              212 p.

              Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) --  
Universidade de Brasília, 2023.

              1. energias renováveis. 2. cenários. 3. transição  
energética. I. Pinheiro do Nascimento, Elimar, orient. II.  
Pinho Brasil Júnior, Antônio César, co-orient. III. Título.

# **CENÁRIOS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL 2040**

**Paula Emilia Oliveira Pimentel**

Tese de Doutorado submetida ao Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Desenvolvimento Sustentável, área de concentração em Política e Gestão da Sustentabilidade.

Aprovada por:

Dr. ELIMAR PINHEIRO DO NASCIMENTO  
CDS/UNB  
Orientador

Dr. ANTÔNIO CÉSAR PINHO BRASIL JÚNIOR  
FT/UNB  
Coorientador

Dr. ALEXANDRE BETINARDI STRAPASSON  
CDS-UnB  
Membro Interno

Dra. MARIA AMÉLIA RODRIGUEZ DA SILVA ENRIQUEZ  
UFPA  
Membro Externo

Dra. ELAINE COUTINHO MARCIAL  
UCB  
Membro Externo

Dra. MARIA AMÉLIA DE PAULA DIAS  
FACE-UnB  
Membro Externo ao Programa (Suplente)

*Aos meus amados pais,  
Paulo e Emília (em memória).*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao universo e à minha família por todo amor e suporte que precisei nesses seis anos tão difíceis, principalmente a minha mãe Emília (*in memoriam*), meu paizinho Paulo, meus irmãos Rosemary e Luiz Henrique, e minhas amadas Gabriela, Amanda e Rosângela;

À Edjane, cuidadora do meu pai, por todo cuidado e carinho com a minha família;

Ao Professor Dr Elimar Pinheiro do Nascimento, pela valiosa e paciente orientação para conclusão desse trabalho;

Ao admirado e inesquecível orientador Professor Dr João Nildo Vianna (*in memoriam*);

Ao Professor Dr Antônio Brasil Júnior pela coorientação e confiança em outros projetos no setor de energia;

Agradeço à Capes e ao Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília, nas pessoas da Dra Doris Sayago, Dra Maria Amélia de Paula Dias, Dr Maurício Amazonas e Dr José Luiz Franco por todo suporte acadêmico para a planejamento, elaboração e conclusão desta tese;

Aos meus incansáveis amigos Dr Gilmar Marques e Dr Júlio César por me incentivarem e acreditarem em mim, tornando meus dias mais alegres com sincera amizade;

Ao Sr Comandante Jefferson Scofield pela amizade, ensinamentos e apoio incondicional;

Ao meu médico e amigo Dr Ugleizer Diniz por brilhantemente ter tratado meus sintomas neurológicos, o que foi fundamental para que eu concluísse este trabalho; e

Por fim, não menos fundamentais, aos meus amigos de toda a vida Alessandro Aléssio (*in memoriam*), Anderson Dorneles, Gabriela Torres, Thaila Ronna, Elaine Costa, Ellen Darc e Luiza Mesquita.

## RESUMO GERAL

A matriz energética global passou por dois grandes períodos de mudanças que acompanharam as revoluções industriais. O primeiro período refere-se à mudança do predomínio do uso da lenha como fonte de energia para o carvão natural, durante a primeira revolução industrial (s. XVIII/XIX). O segundo período foi marcado por transição do carvão para petróleo, durante a segunda revolução industrial (s. XIX/XX). No século XXI, a matriz energética global passa por uma terceira transição, desde 2008, ano em que o petróleo alcançou seus maiores preços por barril. A transição em curso intensifica a participação das energias de menor custo, acessíveis e limpas em emissão de gases de efeito estufa. Ao passo que países ampliam suas oportunidades de acesso, segurança e eficiência energética, organismos internacionais fomentam, a partir de ações de sustentabilidade ambiental, o movimento que estimula a descarbonização da matriz global. Nesse contexto, o Brasil ocupa um lugar de destaque e contraditório, o que representa um desafio, com mais de 48% de sua matriz energética composta por energias renováveis, ao mesmo tempo em que é o nono maior produtor de petróleo do mundo e com grande potencial de expansão com os campos do pré-sal. Por outro lado, possui um grande potencial para ampliar a produção de energia renováveis, por meio das fontes: eólica, solar, biocombustíveis, hidrogênio verde e outras. O desafio para o Brasil encontra-se em como ampliar a participação das energias renováveis em um País rico em combustíveis fósseis, bem como na manutenção das exportações dessas *commodities*. Esse trabalho ocupou-se de analisar qual caminho o Brasil pode seguir, a partir da construção de cenários para o horizonte 2040. Quatro cenários foram construídos com base na visão de especialistas do setor de energia, e podem ser narrativas de reflexão para planejadores e tomadores de decisão para melhor inserção competitiva de organizações e do País na transição energética em curso. Os cenários envolvem incertezas a respeito da velocidade da transição e o impacto do desenvolvimento econômico e das inovações tecnológicas. Para o Brasil, o preço do petróleo, o custo das novas energias, a regulação, as políticas públicas e as pressões por sustentabilidade ambiental são os fatores-chave a serem acompanhados no País. O resultado do trabalho aponta para uma transição gradual no Brasil até 2040.

Palavras-chave: energias renováveis; cenários; transição energética.

## ABSTRACT

The global energy matrix has gone through two major periods of change that accompanied the industrial revolutions. The first period refers to the change in the predominance of the use of firewood as a source of energy to natural coal, during the first industrial revolution (s. XVIII/XIX). The second period was marked by the transition from coal to oil, during the second industrial revolution (19th/20th century). In the 21st century, the global energy matrix is undergoing a third transition since 2008, the year in which oil reached its highest prices per barrel. The ongoing transition expands the share of lower cost, accessible and clean energies in greenhouse gas emissions. As countries expand their opportunities for access, security and energy efficiency, international organizations encourage, based on environmental sustainability actions, the movement that encourages the decarbonization of the global matrix. In this context, Brazil occupies a prominent and contradictory place, which represents a challenge, with more than 48% of its energy matrix composed of renewable energies, at the same time that it is the ninth largest oil producer in the world and with great potential for expansion with the pre-salt fields. On the other hand, it has great potential to expand the production of clean energy, through sources: wind, solar, biofuels, green hydrogen and others. The challenge for Brazil lies in how to expand the share of renewable energies in a country rich in fossil fuels, as well as in maintaining exports of these commodities. This work was concerned with analyzing which path Brazil can follow, based on the construction of scenarios for the 2040 horizon. Four scenarios were constructed based on the vision of specialists in the energy sector, and can be reflection narratives for planners and decision makers for a better competitive insertion of organizations and the country in the current energy transition. The scenarios involve uncertainties about the speed of the transition and the impact of economic development and technological innovations. For Brazil, the price of oil, the cost of new energy, regulation, public policies and pressure for environmental sustainability are the key factors to be monitored in the country. The result of the work points to a gradual transition in Brazil until 2040.

Keywords: renewable energy; scenarios; energy transition.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema geral dos procedimentos metodológicos .....	5
Figura 2 – Transições das fontes primárias de energia e as revoluções industriais.....	13
Figura 3 – Repartição total do consumo de energia por transportadora de energia .....	62
Figura 4 – Etapas da construção de cenários no método <i>Global Business Network</i> (GBN) ..	109
Figura 5 – Ciclo de vida de uma revolução tecnológica.....	117
Figura 6 – Enredos e Cenários para a Transição Energética no Brasil 2040.....	143

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Suprimento mundial de energia total por fonte em terajoule (TJ) .....	26
Gráfico 2 – Emissões de gases de efeito estufa, por país, entre 1990 e 2018. ....	28
Gráfico 3 – Redução dos custos nas energias solar e eólica.....	30
Gráfico 4 – Velocidade da penetração das novas energias no sistema global de energia .....	55
Gráfico 5 – Redução dos custos nas tecnologias de energia limpa .....	61
Gráfico 6 – Matriz Energética Brasileira 2020.....	74
Gráfico 7 – Resultados de emissões nacionais de gases de efeito estufa (GEE), 1990 a 2015, em milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO <sub>2</sub> eq - métrica GWP-100 anos, SAR-IPCC).....	75
Gráfico 8 – Evolução da produção, exportação e importação de petróleo em milhões de barris por dia. ....	80
Gráfico 9 – Evolução das reservas provadas e produção anual de Óleo e Gás no Brasil*\ .....	81
Gráfico 10 – Evolução do consumo final de energia (em milhões de tep).....	93
Gráfico 11 – Evolução do preço do petróleo bruto US\$ por barril. ....	111
Gráfico 12 – Evolução do número de projetos cadastrados por fonte.....	112
Gráfico 13 –Transição energética no Brasil 2040 .....	154

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Classificação do grau de incerteza e importância.....	128
--	-----

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fontes de energia primária .....	10
Quadro 2 – Comparativo entre autores e métodos .....	45
Quadro 3 – Cenários World Energy Outlook 2019 .....	48
Quadro 4 – World Energy Council - Como a Covid-19 está impulsionando uma realocação histórica do investimento em sistemas de energia.....	51
Quadro 5 – Cenários Pós-Covid-19 - World Energy Council.....	56
Quadro 6 – Incertezas globais para a Transição energética segundo o Fórum Econômico Mundial (2020).....	64
Quadro 7 – Transição Energética - Recomendações do Plano Nacional de Energia 2050 .....	95
Quadro 9 – Principais políticas públicas e regulamentação .....	101
Quadro 8 – Fatores-chave da transição energética no século XXI.....	107
Quadro 10 – Lista das principais variáveis indicadas na consulta aos especialistas .....	140

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BioQAV	Bioquerosene de Aviação
CAPEX	Capital Expenditure
CIA	Cross-impact analysis
CSP	Energia solar concentrada
CONPET	Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
GNL	Gás Natural Liquefeito
GtCO <sub>2</sub> e	bilhões de toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente
GW	Gigawatt
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
IEA	International Energy Agency
iNDC	Intended Nationally Determined Contributions
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IRENA	International Renewable Energy Agency
kWh	Kilowatt-hora
LLUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry
MME	Ministério de Minas e Energia
MWh	Megawatt-hora
NDCs	Nationally Determined Contributions
NRDC	Natural Resources Defense Council
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PBEV	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PD&I	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

PEE	Programa de Eficiência Energética
PIB	Produto Interno Bruto
PNAD	Pesquisa Nacional de Amostra de Domicílios
PNB	Política Nacional de Biocombustíveis
PNH <sub>2</sub>	Programa Nacional do Hidrogênio
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
PROALCOOL	Programa Nacional do Alcool
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PNMU	Política Nacional de Mobilidade Urbana
PNPB	Programa Nacional de Produção do Biodiesel
PMT	Probabilistic Modified Trend
TIA	Trend Impact Analysis
SIN	Sistema Interligado Nacional
UHE	Usina Hidrelétrica
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
US\$	Dólar americano
WEC	World Energy Council

## SUMÁRIO

PREFÁCIO.....	0
INTRODUÇÃO GERAL .....	2
<b>Problema de pesquisa.....</b>	<b>3</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>3</b>
<b>Procedimentos metodológicos.....</b>	<b>4</b>
<b>Estrutura da tese.....</b>	<b>6</b>
<b>Contribuição para o conhecimento .....</b>	<b>7</b>
Capítulo 1 – Transições energéticas: evolução e perspectivas para o século XXI.....	8
Introdução.....	9
1. As Transições Energéticas: evolução .....	14
<b>1.1 A Primeira Transição Energética .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 A Segunda Transição Energética .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3 A Terceira Transição Energética .....</b>	<b>24</b>
Conclusão .....	32
Referências .....	33
Capítulo 2 - Cenários prospectivos, tendências e incertezas globais .....	38
Introdução.....	39
<b>1. As principais escolas e métodos de cenários .....</b>	<b>41</b>
2. Os cenários globais em energia .....	47
3. O impacto da pandemia de Covid-19 no setor de energia.....	49
4. Os cenários prospectivos e as metas climáticas.....	53
5. Tendências .....	60
5. Incertezas .....	63
Conclusão .....	66
Referências .....	68
Capítulo 3 – A matriz energética e as perspectivas para a transição no Brasil. ....	72
Introdução.....	73
1. Matriz energética e a questão climática.....	73
2. O potencial energético nacional.....	78
<b>2.1 Petróleo e gás.....</b>	<b>79</b>

<b>2.2 Urânio e carvão mineral.....</b>	<b>83</b>
<b>2.3 Biocombustíveis .....</b>	<b>84</b>
<b>2.4 Hídrica, eólica e solar .....</b>	<b>87</b>
<b>2.5 Hidrogênio.....</b>	<b>88</b>
<b>2.6 Outras fontes promissoras .....</b>	<b>90</b>
3. Os cenários no Plano Nacional de Energia 2050 .....	92
4. Captura e Armazenamento de Carbono .....	98
5. O papel do setor de transporte para a descarbonização .....	98
<b>6. O potencial dos minerais críticos.....</b>	<b>99</b>
<b>7. Principais Políticas públicas e regulamentação .....</b>	<b>100</b>
8. Desafios para a Transição Energética no Brasil .....	102
Conclusão .....	103
Referências .....	104
Capítulo 4 – Forças motrizes, fatores-chave, tendências e incertezas-críticas para a transição energética no Brasil 2040. ....	106
Introdução.....	106
1. Fatores-chave .....	111
3. Forças-motrizes.....	116
3. Tendências .....	118
4. Incertezas .....	124
Conclusão .....	129
Referências .....	131
Capítulo 5 – Transição energética: cenários para o Brasil 2040 .....	134
<b>5.1 Identificação da questão principal.....</b>	<b>138</b>
<b>5.2 Os Fatores-chave .....</b>	<b>138</b>
<b>5.3 As forças-motrizes .....</b>	<b>139</b>
<b>5.4 Tendências e incertezas críticas.....</b>	<b>139</b>
<b>5.5 Enredos dos cenários.....</b>	<b>142</b>
<b>5.6 Cenários.....</b>	<b>144</b>
5.6.1 Criando a ventania.....	144
5.6.2 Aproveitando o Vento.....	146
5.6.3 Parando na Ventania.....	148
5.6.4 Caminhando contra o Vento.....	150
<b>5.7 Validação dos cenários.....</b>	<b>152</b>
<b>5.8 Estratégias para o Brasil.....</b>	<b>154</b>



<b>5.9 Monitoramento dos cenários .....</b>	<b>155</b>
Conclusão .....	155
Referências .....	157
<b>1. Limitações da Pesquisa.....</b>	<b>160</b>
<b>2. Oportunidades para trabalhos futuros .....</b>	<b>160</b>
REFERÊNCIAS GERAIS.....	161
GLOSSÁRIO.....	172
APÊNDICES .....	174
<b>Apêndice 1 - Identificação das variáveis mais importantes e menos importantes para a transição energética no Brasil.....</b>	<b>174</b>
<b>Apêndice 2 - Questionário para identificar as variáveis com maior grau de incerteza e mais importantes para a transição energética no Brasil 2040. ....</b>	<b>175</b>
<b>Apêndice 3 – Lista dos participantes da pesquisa (questionários)* .....</b>	<b>183</b>

## PREFÁCIO

Este trabalho de pesquisa foi iniciado em 2016, durante a fase preparatória para o processo seletivo do Programa de Pós-graduação do Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília, sob orientação do Professor Dr João Nildo Vianna. Desde a sua concepção, houve planejamento para ser desenvolvido em formato de artigos, com intuito de publicação em periódicos especializados.

A partir da revisão bibliográfica sobre transição energética, termo que configura as inovações tecnológicas com foco na redução da participação dos combustíveis fósseis (petróleo e gás) na matriz energética global, também denominado de “descarbonização”, e aumento da oferta em energias renováveis em vários países, a questão sobre o papel do Brasil no mix energético global suscitou a pergunta orientadora da pesquisa: qual caminho o País poderia seguir para aproveitar as oportunidades e enfrentar os desafios das mudanças em curso?

O Brasil figura globalmente como potencial grande produtor de energias renováveis, ao passo que também é um dos dez maiores produtores de petróleo, com a possibilidade de ampliar a produção com o pré-sal. Assim, para orientar planejadores e tomadores de decisão, o método de construção de cenários foi utilizado para explorar hipóteses possíveis para a transição energética no Brasil.

O horizonte do ano 2040 foi escolhido por ser um período nem tão curto, nem tão longo (17 anos), o que confere razoabilidade para as análises por parte dos especialistas. Também marca o período de dez anos após os compromissos assumidos no Acordo de Paris, para redução de emissões do Brasil para 2030, e antecede em dez anos a ambição da Agência Internacional de Energia (em inglês, *International Energy Agency – IEA*) para emissões líquidas zero em 2050, o que permite avaliar a velocidade com que as mudanças são percebidas e implementadas no Brasil nos próximos anos.

Os movimentos por descarbonização da matriz energética global foram impulsionados pela necessidade de acesso e segurança energética, custos mais baixos e pela redução de emissões de gases de efeito estufa, que tem no setor de energia a sua principal fonte em escala global. No Brasil, as emissões são principalmente oriundas das mudanças de uso da terra e indústria, considerando que a matriz elétrica nacional é uma das mais limpas do mundo. Nesse contexto, as mudanças no Brasil estão concentradas, de um lado, na eliminação do desmatamento e no uso do solo, de outro lado, no incremento em energias de fontes limpas, particularmente eólica e solar, bem como em outras tecnologias de baixa ou nula emissão de

carbono, como biocombustíveis e hidrogênio verde, e na redução dos investimentos em energia hídrica, principalmente devido ao custo dos projetos e impactos socioambientais.

Dentre os métodos de construção de cenários, o método da *Global Business Network* (GBN) é amplamente utilizado no setor de energia para identificar cenários possíveis e oferecer uma narrativa a ser analisada em contextos de alta incerteza. O método é composto por oito etapas que foram seguidas neste trabalho para elaborar quatro cenários a respeito da transição energética no Brasil no horizonte de 2040.

## INTRODUÇÃO GERAL

Iniciativas globais de países e organismos internacionais estão considerando a transição energética como prioridade para o caminho de 1,5°C ou de 2°C de aumento médio da temperatura global, conforme pactuado no Acordo de Paris em 2015 por 195 países. Além disso, desde o início da pandemia de Covid-19, as fraquezas e vulnerabilidades de um sistema altamente dependente de óleo e gás foram expostas com variações de oferta, demanda e preço. O cenário foi agravado com a crise provocada pela invasão da Ucrânia pela Rússia e trouxe novos níveis de preocupação e incerteza, impactando os custos para economias em geral, na medida em que permanecem dependentes dos combustíveis fósseis.

Os altos preços dos combustíveis fósseis limitam o acesso à energia e impõem perda de competitividade industrial. Por outro lado, os consumidores estão preocupados com o aumento do custo da energia e impactos climáticos, como alertou o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC: Mudança Climática 2022 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022).

Nos últimos sete anos, mais energia renovável foi adicionada à rede anualmente do que combustíveis fósseis e nuclear combinados. As tecnologias de energia renovável avançam no mercado global de nova capacidade de geração de eletricidade, pois se tornaram as fontes de eletricidade competitivas em muitos mercados. Um nível recorde de 260 gigawatts (GW) de capacidade de geração baseada em fontes renováveis foi adicionado globalmente em 2020, mais de quatro vezes a capacidade adicionada de outras fontes. Energias renováveis, eletrificação e eficiência são os principais impulsionadores da transição energética em curso (IRENA, 2021).

As preocupações e a importância a respeito das decisões a serem tomadas ganham evidência entre os planejadores de políticas públicas, tomadores de decisão e partes interessadas do setor de energia. No que se refere à transição, o que os responsáveis pelas decisões precisam saber para fazerem suas escolhas? O que será encarado como sucesso e fracasso? Quais são as considerações que moldarão os resultados dessas decisões?

Essas são as atuais questões do setor de energia em face às inovações que estão ocorrendo na matriz energética global. Nesse sentido, as incertezas estão sendo adicionadas ao planejamento estratégico de organizações, empresas e países para orientar a tomada de decisão. Como é usual no setor, a construção de cenários evidencia importante contribuição para a aprendizagem organizacional e orientação sobre qual caminho seguir.

O Brasil, por ser o quinto país em extensão territorial, possuir uma das maiores matrizes renováveis em geração de energia elétrica do mundo, possuir a responsabilidade da gestão de

grande parte do bioma da Amazônia e a relevância no cenário econômico, entre as 15 maiores economias no mundo, reúne condições para um papel de protagonista no setor energético e na governança global das mudanças climáticas (Rifkin, 2016). Embora muitos afirmem que o País já passou por uma transição, considerando quase 50% da matriz energética composta por energias renováveis, a redução do avanço das hidrelétricas indica que o País passará por mudanças importantes na oferta de energia. Além disso, o processo de inovação entra em cena em um contexto de alta dependência de petróleo e gás.

### **Problema de pesquisa**

No Brasil, o setor de energia enfrenta o desafio de adaptação às mudanças no ambiente interno, tendo os combustíveis fósseis como importantes geradores de receitas, e externo, principalmente com as inovações tecnológicas para o setor industrial, transportes e geração de energia. A velocidade da transição energética é especialmente relevante para posicionar o País como principal *player* internacional em geração de energia renovável, atrair investimentos e gerar empregos. As principais partes interessadas, tomadores de decisão, planejadores e formuladores de políticas públicas definirão a velocidade da transição e as oportunidades para que o País impulse seu desenvolvimento nacional. Nesse sentido, este trabalho ocupou-se de investigar: Quais os caminhos possíveis para o Brasil no âmbito da transição energética num horizonte temporal até o ano 2040?

### **Objetivos**

O objetivo desta tese de doutorado é elaborar hipóteses de futuro (cenários) para a transição energética no Brasil no período até 2040, com narrativas que indiquem caminhos possíveis a seguir. Os cenários visam identificar e analisar as principais variáveis definidoras das prováveis trajetórias de futuro, em torno das quais os principais atores da cadeia de energia devem tomar suas decisões.

Foram definidos objetivos específicos como passos necessários à compreensão do tema, a partir de uma visão global até a configuração e dinâmica da matriz energética brasileira, a saber:

- Compreender a evolução e os impactos das transições energéticas anteriores e as perspectivas para as mudanças em curso no século XXI;

- Analisar as características da transição energética global, tendências e incertezas, e como os cenários podem ser importantes para orientar as partes interessadas a tomarem as melhores decisões;
- Compreender a composição e dinâmica da matriz energética brasileira;
- Identificar as forças motrizes, fatores-chave, tendências e incertezas-críticas para a transição energética no Brasil; e
- Elaborar enredos e construir cenários para a transição energética no Brasil 2040.

### **Procedimentos metodológicos**

Para compreender os cenários possíveis para a transição energética no Brasil, os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho envolveram a revisão bibliográfica sobre a primeira transição energética de lenha para o carvão, como principal fonte de energia, que corresponde à primeira revolução industrial nos séculos XVIII/XIX. Assim como sobre a segunda transição energética do carvão para o petróleo, que corresponde à segunda revolução industrial, entre os séculos XIX/XX.

Em décadas mais recentes, uma terceira transição energética está substituindo gradativamente o petróleo por outras fontes energéticas como o gás, nuclear, eólica, solar, biomassa, entre outras. A crise do petróleo nos anos 1970, os altos preços desta *commodity* registrados em 2008, a pandemia em 2020/2021 e a guerra da Rússia contra a Ucrânia em 2022 têm acelerado a terceira transição. O motor, desta transição, porém, tem sido a constatação da emergência climática provocada sobretudo pelas atividades humanas, com o aquecimento global e os eventos críticos que tendem a impactar negativamente a dinâmica econômica. Os sucessivos relatórios do IPCC têm indicado o constante agravamento do quadro ecológico, com o acúmulo crescente dos gases de efeito estufa (GEE) que alteram o equilíbrio climático do planeta (IPCC, 2013; 2014; 2021; 2022).

Historicamente, o setor de energia utiliza cenários prospectivos com horizontes futuros para orientar a tomada de decisão para empresas, governos e investidores. Dentre os métodos disponíveis para elaborar cenários, o método da Global Business Network (GBN), por permitir participação de especialistas e fornecer os passos para uma pesquisa qualitativa, mostrou-se adequado aos objetivos desse trabalho.

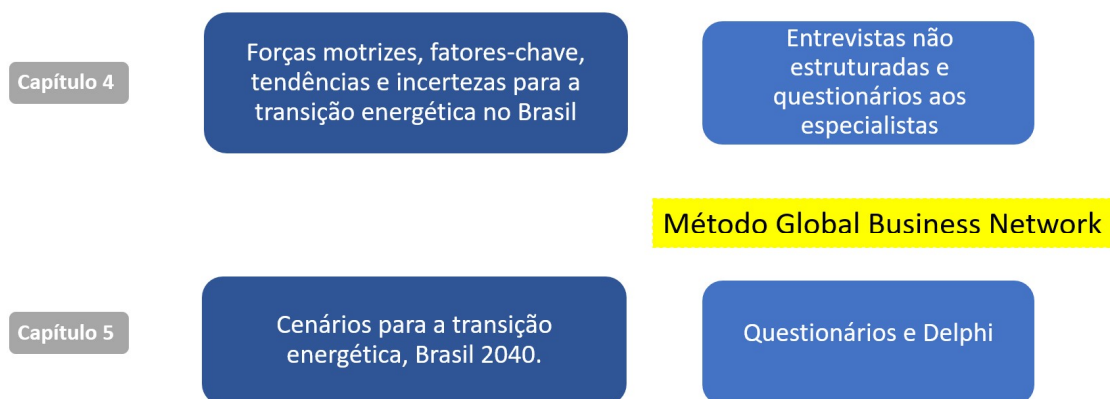
Escolhido o método de análise, o segundo passo foi realizar entrevistas com o Ministro de Minas e Energia (MME) (2019-2022), Almirante Bento Albuquerque, e com alguns servidores do MME para identificar as principais variáveis para a transição energética no Brasil

2040. Simultaneamente, foi elaborado um questionário e aplicado para agentes do setor elétrico para identificar os principais fatores-chave, tendências e incertezas para o setor energético brasileiro. A partir das respostas, foi possível adaptar um novo questionário, com a inclusão de especialistas do governo, representantes do setor de óleo e gás e do setor acadêmico (Apêndice 3).

Com o trabalho de hierarquizar as principais incertezas críticas para a transição por grau de importância e incerteza, foi possível elaborar enredos que resultaram em quatro cenários para o Brasil 2040. Esses cenários foram submetidos para validação entre os especialistas por meio do método Delphi, que permite ajustar o consenso entre os respondentes em rodadas de análise. Os cenários possibilitam a identificação de estratégias sobre os caminhos a seguir no âmbito da transição energética em curso e indicadores de monitoramento.

**Figura 1 – Esquema geral dos procedimentos metodológicos**





Fonte: Elaboração própria.

### Estrutura da tese

O capítulo 1 apresenta como ao longo da história da humanidade, mudanças estruturais na forma de produzir e disponibilizar energia foram fundamentais para impulsionar os processos produtivos. Essas mudanças são chamadas de Transições Energéticas e foram caracterizadas por inovações tecnológicas que acompanharam o desenvolvimento econômico das sociedades. A convergência de condições econômicas e sociais favoráveis e as inovações em energia resultaram na primeira revolução industrial. Neste contexto, o Capítulo 1 tem por objetivo analisar, em linhas gerais, o histórico das transições energéticas, sua evolução e perspectivas para a transição energética do século XXI.

O capítulo 2 analisa como a transição energética em curso envolve mudanças decorrentes das pressões por descarbonização da economia e aumento da eletrificação gerada por tecnologias renováveis no mix de energia. A velocidade dessa transição é especialmente relevante para que a meta climática de 1,5°C até 2030 pactuada no Acordo de Paris seja alcançada. Nesse capítulo são analisados procedimentos metodológicos para a construção de cenários prospectivos e o como cada elemento atua nos cenários.

O capítulo 3 aborda as políticas públicas adotadas pelo governo brasileiro ao longo dos últimos 50 anos, associadas às condições naturais do País, que possibilitaram ao Brasil uma grande participação de fontes energéticas renováveis (48,3% em 2020) com destaque para as hidrelétricas. Estas fontes apresentam baixa emissão de gases de efeito estufa, entretanto, as recentes crises de energia provocadas pela escassez hídrica acenderam os alertas sobre a segurança energética do País. Destacam-se a fonte hidráulica, os derivados da cana, assim como o crescimento da participação de fontes renováveis, como a eólica e a solar nos últimos cinco



anos. Ao mesmo tempo, o Brasil é um dos maiores produtores de petróleo do mundo, o que acrescenta um complicador a mais no processo da transição energética.

O capítulo 4 busca compreender a transição energética do século XXI, que envolve identificar as principais forças do ambiente, ou fatores-chave, forças-motrizes, tendências e incertezas críticas para o Brasil, que estão estreitamente relacionadas às mudanças que estão ocorrendo no setor energético e com as decisões dos principais atores do setor. Estudar a transição energética envolve estudar aspectos futuros, porque as mudanças ainda estão em andamento, e ainda são cercadas de incertezas a respeito da velocidade da transição. A velocidade da transição é um aspecto especialmente relevante para cumprir as metas de descarbonização, garantir eficiência e segurança energética ao passo que as economias globais perseguem suas metas de crescimento econômico.

O capítulo 5, o último, apresenta os cenários para a transição energética no Brasil para o período até 2040. O desenvolvimento econômico e as inovações tecnológicas são as forças-motrizes da transição energética do século XXI. A inovação tecnológica é uma condição necessária para um período prolongado de crescimento econômico, aliada a uma estrutura socioinstitucional compatível com as novas tecnologias. Cada revolução tecnológica conduziu uma profunda transformação do conjunto de tecnologias utilizadas, tanto pela simples substituição quanto pela modernização do equipamento e dos processos existentes.

### **Contribuição para o conhecimento**

Esse trabalho contribui para o conhecimento em reunir a visão dos especialistas do setor de energia sobre as narrativas possíveis para a transição energética no Brasil até 2040. Outros fatores-chave são importantes para definir os rumos da transição no Brasil, tais como o preço dos combustíveis fósseis em relação às renováveis, os aspectos regulatórios e as políticas públicas.

A construção de cenários tem por objetivo orientar os atores e tomadores de decisão, tanto no setor público como privado, sobre escolhas possivelmente bem-sucedidas. A partir da compreensão do comportamento das variáveis que compõem o fenômeno da transição, os cenários orientam estratégias para aproveitar as oportunidades e lidar com as ameaças para as empresas em geral e o setor energético, em particular, com impactos diretos ao desenvolvimento do País.

## Capítulo 1 – Transições energéticas: evolução e perspectivas para o século XXI.

*Energy is the only universal currency:  
one of its many forms must be transformed to get anything done.  
(Smil, 2017).*

### Resumo

Ao longo da história da humanidade, mudanças estruturais na forma de produzir e disponibilizar energia foram fundamentais para impulsionar os processos produtivos. Essas mudanças são chamadas de Transições Energéticas e foram caracterizadas por inovações tecnológicas que acompanharam o desenvolvimento econômico das sociedades. A história das transições energéticas é longa e complexa, e tomou um ritmo específico em cada país. Entretanto, em linhas gerais, é possível identificar três períodos de mudanças na matriz energética global. A primeira transição energética ocorreu quando o carvão mineral substituiu a queima da biomassa e passou a alimentar motores a vapor, configurando a primeira revolução industrial no século XVIII. A busca por eficiência e o aumento das demandas por máquinas colocaram o petróleo como impulsionador da segunda revolução industrial, com a disseminação dos motores a combustão no século XIX. A terceira revolução industrial esteve calcada na disponibilidade e acesso aos combustíveis fósseis e à energia elétrica para viabilizar a revolução técnico-científica-informacional no século XX. No século XXI iniciaram-se as preocupações a respeito da emergência climática com contribuição da queima dos combustíveis fósseis, conflitos entre países produtores e consumidores e alto preço destas fontes de energia. Neste panorama, este capítulo analisa, em linhas gerais, o histórico das transições energéticas, sua evolução e perspectivas para a transição energética global do século XXI. As energias renováveis figuram como alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e garantir segurança energética por meio da geração descentralizada de energia. Em paralelo, há a preocupação de atender a demanda de energia e as inovações que estão definindo os contornos da Quarta Revolução Industrial em curso no século XXI e focada em mudanças tecnológicas, inovadoras, descentralizadas e que visam, em sua maioria, diminuir os efeitos negativos das emissões de gases de efeito estufa.

**Palavras-chave:** energia; transição energética; revolução industrial;

### Abstract

Throughout human history, structural changes in the way energy has been produced and provided were essential to boost the productive processes. These changes are called Energy Transitions and were characterized by technological innovations that followed the societies economic development. In fact, the history of energy transitions is long and complex, and has taken a specific rhythm in each country. However, in general terms, it is possible to identify three periods of drastic changes in the global energy matrix. The first energy transition occurred when coal replaced the burning of biomass and started to power steam engines, setting up the first industrial revolution in the eighteenth century. The quest for efficiency and the increased demand for machines placed oil as the driver of the second industrial revolution, with the spread of combustion engines in the nineteenth century. The third industrial revolution was based on the availability and access to fossil fuels and electricity to enable the technical-scientific-informational revolution in the twenty century. Finally, in the 21st century, concerns began about the climate emergency with a contribution from the burning of fossil fuels, conflicts

between producing and consuming countries and the high price of these energy sources. In this context, renewable energies are an alternative to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and ensure energy security through decentralized energy generation. At the same time, there is a concern to meet the demand for energy and the innovations that are defining the contours of the Fourth Industrial Revolution underway in the twenty-first century and focused on technological, innovative, decentralized changes and aimed, for the most part, at reducing the negative effects of greenhouse gas emissions. In this context, this chapter analyzes, in general terms, the history of energy transitions, their evolution and perspectives for the global energy transition of the twenty-first century. Renewable energies are an alternative to reducing greenhouse gas (GHG) emissions and ensuring energy security through decentralized energy generation. In parallel, there is a concern to meet the demand for energy and the innovations that are defining the contours of the Fourth Industrial Revolution underway in the 21st century and focused on technological, innovative, decentralized changes that aim, for the most part, to reduce the negative effects of greenhouse gas emissions.

**Keywords:** energy; energy transition; industrial revolution;

## Introdução

A energia é um conceito essencial da física e refere-se ao potencial para executar trabalho ou realizar uma ação. Qualquer coisa que esteja trabalhando, aquecendo ou movendo outro objeto está utilizando energia. A vida humana na Terra depende da conversão por fotossíntese da energia solar em biomassa vegetal e dos fluxos de energia presentes no planeta. Em humanos e nos animais, o metabolismo dispõe os nutrientes para auxiliar o crescimento dos tecidos, mantém as funções e a temperatura corporais e gera a energia para a atividade dos músculos.

A evolução das sociedades humanas, desde a pré-história até os dias de hoje, pode ser vista como a busca por controlar maiores estoques e fluxos de formas de energia mais concentradas e versáteis, e convertê-los, de maneiras mais acessíveis, a custos mais baixos e com maior eficiência, seja em calor, luz e/ou movimento (Smil, 2017).

O Princípio de Lotka define que:

“Em todos os casos considerados, a seleção natural operará de modo a aumentar a massa total do sistema orgânico, para aumentar a taxa de circulação da matéria através do sistema, e para aumentar o fluxo total de energia enquanto houver um resíduo não utilizado de matéria e energia disponível” (Lotka 1922, *apud* Smil, 2017 p.148).

Para Lotka, os organismos que sobrevivem e evoluem são aqueles que capturam e usam energia de forma mais eficiente. Estendendo sua estrutura energética à sociedade humana, Lotka sugeriu que a mudança na dependência da energia solar para a energia não renovável representa desafio fundamental para a sociedade.

Segundo Odum (1971), a disponibilidade de fontes de energia determina a quantidade de atividade de trabalho que pode existir, e o controle desses fluxos determina o poder das atividades humanas e sua influência relativa na natureza. Toda forma de energia disponível na natureza, antes de ser convertida ou transformada, é chamada de energia primária. Quando não é utilizável diretamente, deve ser transformada numa fonte de energia secundária (eletricidade, calor). O quadro 1 demonstra as fontes de energia primária:

**Quadro 1 – Fontes de energia primária**

Formas de energia primária	
Energia humana e animal	energia mecânica de tração.
Energia mecânica	energia hidráulica transformada em energia mecânica (moinhos) ou elétrica (central hidroelétrica); energia maremotriz (das marés) transformada em energia elétrica; e energia eólica (vento) transformada em energia mecânica (moinhos, veleiros) ou eletricidade (aerogeradores).
Energia química	combustíveis minerais: carvão, lignito; hidrocarbonetos: gás natural, petróleo; resíduos sólidos: incineração do lixo; e biomassa: madeira, formados de matéria orgânica, transformados em combustíveis diversos: madeira e derivados, biodiesel, biogás, metanol, etanol, produtos e rejeitos vegetais.
Energia nuclear	fissão: energia obtida por meio da separação dos átomos do urânio e do plutônio; e fusão: energia obtida por meio da união dos átomos.
Energia solar	radiação solar.
Energia térmica terrestre	geotérmica.

Fonte: Elaboração própria.

Apesar das sociedades utilizarem diversas fontes de energia desde a pré-história, a compreensão do potencial, armazenamento e conversões foi expandida e sistematizada principalmente durante o século XIX, e esse conhecimento foi aperfeiçoado durante o século XX (Smil, 2017).

A matriz energética é entendida como o conjunto de fontes de energia disponíveis para suprir a necessidade (demanda) global ou de um determinado país. Ao longo da história da humanidade, as mudanças tecnológicas altamente dependentes de energia ocorreram principalmente nos países de maior crescimento econômico e depois foram expandidas para outras localidades, consequentemente, provocando mudanças nas matrizes energéticas.

Em uma análise global, a primeira transição energética ocorreu quando o carvão substituiu a queima de lenha (biomassa) e passou a alimentar motores a vapor, configurando a

primeira revolução industrial, a partir da segunda metade do século XVIII. As histórias britânicas, francesas e norte-americanas de uso de energia mostram que todos experimentaram uma transição muito lenta dos combustíveis de biomassa para o carvão.

Essa mudança histórica ocorreu durante os primeiros estágios da industrialização ocidental e, por outro lado, a impulsionou para que de fato acontecesse. Entretanto, o tempo entre invenção, inovação e difusão comercial em grande escala foi longo. Smil (2017) destaca alguns motivos para esses avanços ocorrerem de forma lenta: a compreensão científica dos processos era muitas vezes inadequada, os materiais de alto desempenho necessários para a produção em massa (aço em particular) não estavam disponíveis ou eram escassos, os processos de fabricação eram inadequados, as infraestruturas necessárias demoravam muito a ser concluídas e não existiam mercados competitivos em grande escala.

Mas, quando superados esses desafios, o carvão passou a ser a principal fonte de energia primária utilizada nos países que iniciaram sua primeira revolução industrial e primeira transição energética. A partir de então, a busca por eficiência e o aumento das demandas por máquinas fomentou o processo de inovação para a produtividade fabril. Nesse período, os combustíveis líquidos (benzeno, óleo, gasolina) e o gás passaram a figurar como impulsionadores da segunda revolução industrial e da segunda transição energética, com a disseminação dos motores a combustão na segunda metade do século XIX.

As duas transições ocorreram durante os últimos três séculos em algumas sociedades europeias e apenas, há 70 anos, na China e há 50 anos na Índia. O surgimento da eletricidade, como a forma de energia da mais alta qualidade, começou apenas durante a década de 1880. Inevitavelmente, essas transições começaram em pequenas escalas locais, evoluíram para o âmbito nacional e, por fim, tornaram-se fenômenos globais (Smil, 2017).

A energia elétrica tornou-se uma das principais formas de energia secundária no mundo, e possibilitou mudanças importantes na sociedade. A terceira revolução industrial esteve calcada na disponibilidade e acesso aos combustíveis fósseis e à energia elétrica, para viabilizar a revolução técnica-científica-informacional no século XX.

A disponibilidade de energia elétrica permitiu uma série de automatizações, desde as residências até grandes fábricas. Por fim, o século XXI marca o início das preocupações a respeito da poluição e aquecimento global como resultado da queima de combustíveis fósseis. Na quarta revolução industrial, fase em que muitos países se encontram, principalmente os desenvolvidos, as matrizes energéticas passam por uma transição. As mudanças que caracterizam a transição energética do início do século XXI são tecnológicas, inovadoras, descentralizadas e visam, em sua maioria, diminuir os efeitos negativos das emissões de gases

de efeito estufa (GEE<sup>1</sup>), amplamente aceitas como uma das causas da emergência climática, e que tem gerado efeitos catastróficos com eventos climáticos extremos e impactos ambientais em muitas regiões do planeta (Crutzen e Stoermer, 2000; Steffen *et al.*, 2004; IPCC, 2014; IPCC, 2021).

Com a redução dos custos da tecnologia e do preço para comercialização, bem como a possibilidade de descentralizar a produção de energia, as fontes de energia renovável aparecem como sendo o principal *driver* da transição energética do século XXI. As fontes renováveis são um caminho para a redução das emissões GEE oriundas dos combustíveis fósseis. Com a descentralização da geração de energia, há uma ampliação da rede de compartilhamento, a necessidade de tecnologias para armazenamento de energia e a busca por maior eficiência energética. Nesse contexto, o presente capítulo tem por objetivo analisar, em linhas gerais, o histórico das transições energéticas, sua evolução e perspectivas para a transição energética do século XXI.

Para revisão bibliográfica, foram selecionadas análises amplas que auxiliam a compreender o potencial e a natureza das transições energéticas em consonância com as revoluções industriais conforme os trabalhos de Hobsbawm (1982, 1999); Santos (1997); Allen, (2009); Mokyr (2009); Pearson, & Foxon (2012) e Smil (2017), e as relações entre revoluções industriais e energia com os trabalhos de Geller (2003); Sachs (2007); Wrigley (2010); Rifkin (2012); Teske (2013) e Smil (2016).

Este capítulo não pretende ser uma narrativa minuciosa das transições energéticas, mas sim uma interpretação das mudanças ocorridas ao longo da história humana sobre energia e desenvolvimento. Embora a teia da história não possa ser desfeita de maneira linear e compartimentada, uma certa subdivisão do assunto é essencial para compreender momentos de mudanças e relações em análise. Também não é objetivo deste capítulo traçar exaustivamente como e porque alguns elementos foram essenciais às transições energéticas, mas explorar as consequências e as mudanças que ocorreram e ainda estão em curso.

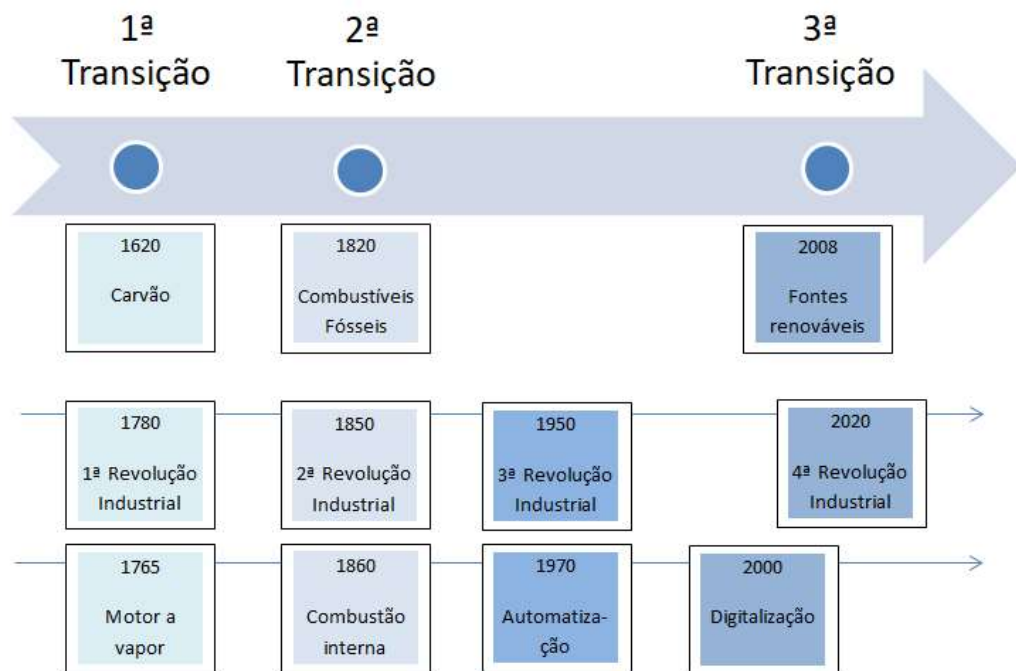
A figura 1<sup>2</sup> apresenta a linha do tempo das transições energéticas, as principais fontes de energia, as mudanças na forma de produzir e suas tecnologias hegemônicas. Na figura, combustíveis fósseis incluem carvão, óleo e gás.

---

<sup>1</sup> Os gases de efeito estufa (GEE) são gases que absorvem uma parte dos raios solares e os redistribuem em forma de radiação na atmosfera, aquecendo o planeta em um fenômeno chamado efeito estufa. Os principais GEE são: gás carbônico (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e os halocarbonos (clorofluorcarbonos (CFCs), os hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) os hidrofluorcarbonos (HFCs)). O desequilíbrio na concentração desses gases ocasiona um aumento da temperatura em algumas regiões do planeta e mudanças climáticas.

<sup>2</sup> Esta cronologia, de caráter ilustrativo, foi adotada para compreender a linha do tempo das revoluções industriais e as transições energéticas e não determinam os anos exatos.

Figura 2 – Transições das fontes primárias de energia e as revoluções industriais



Fonte: Elaboração própria com base em Hobsbawm (1982, 1999); Smil (2017); Rifkin (2012); Wrigley (2010).

Há uma conjunção de problemas que aumentam a incerteza do processo de mudança energética. Segundo o Conselho Mundial de Energia (WEC, em inglês), o mundo enfrenta o trilema da acessibilidade, confiabilidade e sustentabilidade da matriz energética. No que se refere ao acesso, uma em cada oito pessoas da população mundial não dispõe de eletricidade. Também é projetado ano a ano o aumento demográfico e o aumento da demanda por energia. Outro aspecto é que existem problemas de confiabilidade no sistema energético. Os riscos para o abastecimento de petróleo e gás foram expostos com a crise na Venezuela, a pandemia de Covid-19, os conflitos Rússia x Ucrânia e no Oriente Médio e novos desafios estão entrando em foco no setor de energia, como a flexibilidade do sistema para a segurança cibernética (World Energy Council, 2013).

Segundo a Agência Internacional para as Energias Renováveis (em inglês *International Renewable Energy Agency* - IRENA), para que a transição energética de fato impulse o desenvolvimento global, é fundamental criar um sistema de energia sustentável, acessível, seguro e inclusivo (IRENA, 2019).

Sob o aspecto da sustentabilidade, desde o final de 2015, com o Acordo de Paris<sup>3</sup>, a transição energética assumiu uma urgência e um imediatismo pronunciados, como parte da resposta internacional às mudanças climáticas. Embora o futuro da energia seja difícil de prever, o novo paradigma aborda segurança energética, crescimento sustentável, com soluções para países deficitários em acesso e consistente dependência de outros países.

Alguns autores chamam esse período de mudanças na forma e nos insumos que a humanidade utiliza as fontes de energia de “Revolução Energética” (Geller, 2003; Sachs, 2007; Wrigley, 2010; Rifkin, 2012, Teske, 2013). Entretanto, este trabalho prefere o termo “Transição Energética” tendo em vista as mudanças graduais na utilização das fontes energéticas que sucederam ao longo dos séculos XVIII e XIX. Sobretudo que o termo “revolução” remete a "grande transformação, mudança sensível de qualquer natureza, seja de modo progressivo, contínuo, seja de maneira repentina" (REVOLUÇÃO, 2023). Em relação à matriz energética, os processos que ocorreram foram lentos, embora as mudanças ocorridas tenham gerado grande impacto na sociedade. Além disso, as mudanças em curso no século XXI já possuem sua denominação consolidada como “Transição Energética” (Smil, 2016; IRENA, 2020; IEA, 2021; WEF, 2021). A inovação tecnológica, o surgimento de novos mercados de energia e uma demanda cada vez maior por serviços de energia mais eficientes, acessíveis e flexíveis foram os fatores que impulsionaram essas mudanças.

## **1. As Transições Energéticas: evolução**

### **1.1 A Primeira Transição Energética**

Ao longo da história da humanidade, a forma como as sociedades desempenharam suas atividades de construção, produção, inovação, guerra, transporte etc, dependeu de alguma fonte de energia primária. Desde que os primeiros grupos humanos passaram da condição de caçadores e coletores nômades para cultivadores de alimentos para sua comunidade “sedentária”, o fogo, oriundo da queima de biomassa (madeira, principalmente), permitiu muitas mudanças no modo de vida humano, como aquecimento, iluminação e cocção.

Inicialmente, a força humana era a energia disponível para executar qualquer trabalho. Com a domesticação de alguns animais, estes passaram a ser uma opção de transporte e aumentaram a disponibilidade de força para outras atividades.

---

<sup>3</sup> Tratado mundial que possui por objetivo reduzir o aquecimento global. Ele foi discutido entre 195 países durante a 21ª Conferência da Convenção-Quadro das Nações Unidas (COP 21), em Paris. O compromisso internacional foi aprovado em 12 de dezembro de 2015 e entrou em vigor no dia 4 de novembro de 2016.



Grande parte das atividades das sociedades anteriores analisadas por Vaclav Smil (2017), principalmente Egito, Roma e China, foi baseada na força humana e na tração animal. Com a necessidade de ampliar a quantidade de energia disponível, moinhos de vento e roldanas movidas à água foram importantes fontes de energia cinética.

Smil (2017) descreve estruturas construídas por praticamente todas as culturas antigas que exigiam trabalho intenso e aplicações de dispositivos de alívio do trabalho humano, começando com alavancas simples, polias, guindastes, molinetes e rodas de rolamento. O trabalho e as conversões das energias cinéticas da água e do vento (por velas e moinhos) foram os únicos motores nas sociedades tradicionais (*Ibidem*, p. 127 a 129).

Em meados de 1700 houve a transição da lenha para o carvão, o que configurou a primeira transição energética, mas ainda assim, pessoas e animais desempenhavam importante participação nas fontes primárias de energia.

Cada região seguiu um ritmo diferente na utilização do carvão como matéria-prima energética. Desde a Dinastia Han (202 a.C.-220 d.C.), na China, o carvão era utilizado na produção de ferro. Os registros europeus mostram a primeira extração na Bélgica em 1113, os primeiros embarques para Londres em 1228, as primeiras exportações da região de Tynemouth para a França em 1325, e a Inglaterra se tornou o primeiro país a realizar a mudança de combustíveis de origem vegetal para carvão somente nos séculos XVI e XVII (Smil, 2017).

Nef (1932), citado por Smil (2010), apontou a falta de disponibilidade de madeira em algumas cidades da Inglaterra como a principal razão para a expansão da mineração de carvão entre 1550 e 1680. Outra questão que contribuiu para ascensão do carvão foi o preço. Em 1600, os preços do carvão eram cerca de metade dos preços da madeira quando comparados por unidade de energia bruta, e na época os preços da madeira começaram a subir durante a segunda metade do século XVII (impulsionados não apenas pelas indústrias em crescimento, mas também pela expansão da construção naval), o carvão era a fonte dominante de energia para a maioria das indústrias britânicas, bem como para aquecimento doméstico (Hatcher, 1993 *apud* Smil, 2017).

O historiador Eric Hobsbawn (1982), ao analisar a revolução industrial e a revolução francesa, explica que:

A grande revolução de 1789-1848 foi o triunfo não da "indústria" como tal, mas da indústria capitalista; não da liberdade e da igualdade em geral, mas da classe média ou da sociedade "burguesa" liberal; não da "economia moderna" ou do "Estado moderno", mas das economias e Estados em uma determinada região geográfica do mundo (parte da Europa e alguns trechos da América do Norte), cujo centro eram os Estados rivais e vizinhos da Grã-Bretanha e França. A transformação de 1789-1848 é

essencialmente o levante gêmeo que se deu naqueles dois países e que dali se propagou por todo o mundo (Hobsbawn, 1982, p. 3).

Sob outro aspecto, explicar os avanços tecnológicos do século XVIII é a chave para explicar a revolução industrial. A máquina a vapor, a fiação de algodão e a fabricação do ferro com carvão e coque inauguraram uma era de expansão industrial e de novas inovações tecnológicas que mudaram o mundo. Outras características da Revolução Industrial (rápida urbanização, acúmulo de capital, aumento da produtividade agrícola, crescimento da renda) foram consequências do aprimoramento das tecnologias aplicadas.

Segundo Allen (2009), a expansão do início da economia moderna (1500-1750) mostra que ela gerou uma estrutura única de salários e preços na Grã-Bretanha do século XVIII: os salários eram notavelmente altos e a energia era notavelmente barata. A Revolução Industrial ocorreu na Grã-Bretanha no século XVIII porque foi economicamente viável, embora não tivesse sido lucrativa em outras épocas e lugares. A máquina a vapor, a estrutura hidráulica, a fiação e o alto-forno a coque aumentaram o uso de carvão e capital em relação ao trabalho e foram adotados porque a mão-de-obra era de alto custo e o carvão a baixo custo, não ocorrendo em outras partes pela relação inversa: salários de baixos e energia de alto custo.

A fábrica de algodão e o alto-forno de coque foram inventados na mesma região porque economizaram insumos que eram escassos e aumentaram o uso de insumos abundantes e baratos. Por esse motivo, essas técnicas não foram adotadas imediatamente no continente ou em qualquer outro lugar do mundo. A lenta adoção da tecnologia britânica no continente só ocorreu entre 1850 e 1873 e teve menos a ver com guerra, instituições e cultura do que com a economia da nova tecnologia, que não era lucrativa para ser adotada em outro país (Allen, 2009). Sobre a expansão da Revolução Industrial, Allen (2009) leciona que:

Engenheiros britânicos estudaram a máquina a vapor e o alto-forno e os aprimoraram para reduzir custos. O consumo de carvão em cavalos-força-hora por uma máquina a vapor, por exemplo, caiu de 45 libras para 2 libras. Isso tornou lucrativo usar máquinas a vapor em qualquer lugar - mesmo onde o carvão era caro. O sucesso da Grã-Bretanha no início da Revolução Industrial baseou-se na invenção de tecnologia adaptada às suas circunstâncias e inútil em outros lugares. Em meados do século XIX, a engenharia britânica aprimorou as tecnologias, eliminando, assim, a vantagem competitiva que elas conferiam à Grã-Bretanha. A fábrica de algodão, a máquina a vapor e o alto-forno a coque eram agora tecnologias globalmente apropriadas, e seu uso rapidamente se espalhou para fora da Grã-Bretanha. A difusão global marcou o fim da Revolução Industrial e foi determinada pela história de vida da tecnologia (Idem, p. 9).

Em outra análise, Mokyr (2009) define a Revolução Industrial como "o conjunto de eventos que colocaram a tecnologia na posição de principal motor da mudança econômica" (p.

5). Para esse autor, a Grã-Bretanha se tornou o líder da Revolução Industrial porque, mais do que qualquer outra economia europeia, tirou proveito de sua dotação de recursos humanos e físicos graças à grande sinergia do Iluminismo: a combinação do programa baconiano em conhecimento útil e o reconhecimento de que instituições melhores criaram melhor incentivos.

Mokyr (2009) sugere que o necessário para gerar uma revolução industrial era a combinação certa de conhecimento útil gerado por cientistas, engenheiros e inventores para ser explorado por um estoque de artesãos qualificados em um ambiente institucional que produziu os incentivos corretos para empreendedores. As vantagens da Grã-Bretanha devem ter estado no lado da oferta e não na demanda da economia, já que a Holanda era mais rica, a França era maior e a Espanha tinha mais colônias.

O Iluminismo é, normalmente, visto como tendo dois efeitos favoráveis em termos de melhoria, tanto das capacidades tecnológicas, quanto da qualidade institucional. O programa baconiano compreendia pesquisas baseadas na experimentação e no método científico, direcionando a agenda de pesquisa para se concentrar na resolução de problemas práticos, e tornando os resultados amplamente acessíveis pela organização e disseminação do conhecimento. Mokyr (Idem) reconhece que o impacto do Iluminismo nas instituições é difícil de quantificar, mas argumenta que o sucesso de sua ideologia reduziu o rentismo e promoveu os mercados competitivos.

Essas mudanças foram graduais. As rodas d'água e os moinhos de vento mantiveram (ou até aumentaram) sua importância durante a primeira metade do século XIX, os navios a vela se tornaram meios pouco utilizados de transporte oceânico somente após 1880, e os animais de tração dominaram a agricultura ocidental até depois da Primeira Guerra Mundial (Smil, 2017).

O tipo de fonte energética utilizada ditou o surgimento e a velocidade com que as mudanças impactavam o modo de produção e a configuração das sociedades. As minas de carvão e a invenção da máquina a vapor possibilitaram a construção de uma nova economia. A máquina a vapor passou a mover as fábricas e os teares, as locomotivas das primeiras ferrovias e os navios que substituíram as embarcações movidas à vela. As pessoas, as mercadorias, os capitais e as ideias passaram a circular a uma velocidade até então desconhecida. Rapidamente surgiram as primeiras cidades populosas (Hobsbawm, 1982).

Somente no início do século XX a revolução industrial apresentou sinais de progresso nos Estados Unidos. Mesmo com relativo atraso, a Inglaterra iniciou a primeira transição energética no mundo, em paralelo com a sua revolução industrial, ao usar o carvão em substituição à lenha.

O fato fundamental na Grã-Bretanha nas primeiras duas gerações da revolução industrial foi que as classes ricas rapidamente acumulavam grande quantidade de renda que excediam todas as possibilidades disponíveis de gasto e investimento. A Grã-Bretanha possuía uma economia bastante forte e um Estado suficientemente agressivo para conquistar os mercados de seus competidores e investir em inovações (Wrigley, 2010).

A energia foi o esteio da primeira e das demais revoluções industriais. Sob qualquer aspecto, a primeira revolução industrial foi provavelmente o mais importante acontecimento na história do mundo, pelo menos desde a descoberta do fogo, da agricultura e o surgimento das cidades. Sobre o papel do carvão no desenvolvimento das cidades, Hobsbawm (1982) salienta que

O carvão era a principal fonte de energia industrial do século XIX, como também um importante combustível doméstico, graças em grande parte à relativa escassez de florestas na Grã-Bretanha. O crescimento das cidades, especialmente de Londres, tinha causado uma rápida expansão da mineração do carvão desde o final do século XVI. Em 1800, a Grã-Bretanha deve ter produzido perto de dez milhões de toneladas de carvão, ou cerca de 90% da produção mundial. Seu competidor mais próximo, a França, produziu menos de um milhão (Idem, p. 31-32).

A indústria do carvão foi a responsável por estimular a invenção da ferrovia. Essa invenção transformou as indústrias de bens de capital. As minas não só necessitavam de máquinas a vapor em grande quantidade e de grande potência, mas também de meios de transporte eficientes para trazer grandes quantidades de carvão do fundo das minas até a superfície e para carregar da superfície aos pontos de embarque.

As ferrovias conferiram uma velocidade ainda maior aos meios de transporte de cargas e pessoas e perduraram como principal meio de transporte para longas distâncias até o final do século do XX em muitas regiões da Europa. Entretanto, o amadurecimento das máquinas e dos processos produtivos requeriam cada vez mais eficiência energética. As inovações em máquinas e combustíveis começaram a ser testadas na primeira metade do século XIX. Máquinas a combustão interna movidas a gás, óleo e a energia elétrica eram as inovações que trariam eficiência e permitiriam invenções no campo das comunicações e transporte.

O motor a combustão interna conseguia um aproveitamento melhor da energia oriunda do gás e combustíveis líquidos<sup>4</sup>. O primeiro protótipo desse tipo de motor data de 1897 (Smil, 2016). A intensificação do mercado automotivo com o surgimento do modelo Ford-T em 1908 fez com que, já em 1911, a venda de gasolina ultrapassasse a de querosene. O surgimento da

---

<sup>4</sup> O ano de 1859 é considerado o marco zero da industrialização do petróleo, quando Edwin Drake descobriu petróleo a uma profundidade de 21 metros em Tutsville, nos EUA. Até então, o petróleo aproveitado era o que aflorava na superfície.

indústria petroquímica em 1930 deu origem a vários outros subprodutos para produção de equipamentos, objetos, produtos, entre outros, principalmente a gasolina.

As transições energéticas referem-se àqueles períodos que envolvem mudança, em que uma fonte de energia se tornou mais utilizada em relação às outras anteriores. A história das transições energéticas é longa e complexa porque as invenções não surgiram em curto tempo. As inovações demandaram longos períodos de pesquisas e testes até que determinada tecnologia fosse consolidada na sociedade. Como é o caso da eletricidade.

Desde o Antigo Egito há relatos sobre a observação do peixe-elétrico. Os gregos antigos já sabiam que o âmbar, quando sofre atrito, atrai elementos leves, como as penas. Mas ao longo de toda história humana, em várias civilizações, muitos cientistas fizeram contribuições fundamentais para que a eletricidade fosse difundida tal qual como utilizamos hoje em dia. Alessandro Volta, André-Marie Ampère, Georg Simon Ohm, Thomas Edison, Nicola Tesla, Michael Faraday, Benjamin Franklin são nomes que contribuíram para a consolidação de princípios e sistemas elétricos.

Mas foi Thomas Edison, o cientista estadunidense reconhecidamente inventor da lâmpada elétrica em 1879, que marcou o primeiro passo para o amplo uso da energia elétrica na sociedade. Para as lâmpadas funcionarem, Edison desenvolveu um sistema de distribuição elétrico para luz e força, inclusive geradores, motores, soquetes de luz, caixas de junção, fusíveis de segurança, condutores subterrâneos e outros dispositivos.

Em 1882, Thomas Edison construiu as primeiras usinas geradoras em corrente contínua, para o atendimento de sistemas de iluminação. Em 1886, foi feita a primeira transmissão de energia elétrica em corrente alternada por George Westinghouse. O uso da corrente alternada e dos sistemas polifásicos desenvolvidos por Nikola Tesla, em conjunto com o transformador eficiente de Willian Stanley, proporcionaram a transmissão a grandes distâncias e o uso doméstico da energia elétrica (Walter, 2010). As bases para o início da comercialização da energia elétrica em 1880 foram iniciadas antes de 1850. Assim, estavam disponíveis as fontes energéticas nas quais se basearam a segunda revolução industrial e a segunda transição energética: petróleo e energia elétrica.

O surgimento da Segunda Revolução Industrial é geralmente datado de 1830 ou 1850, quando apareceram novas indústrias - primeiro a ferrovia e os navios a vapor e, em seguida, novas manufaturas, como o aço.

## **1.2 A Segunda Transição Energética**

A utilização do petróleo em larga escala como fonte de energia começou nos Estados Unidos. A exploração do primeiro poço ocorreu em 1901, no Texas (Hobsbawn, 1999). Entretanto, o uso de combustíveis fósseis já estava presente desde a antiguidade para fins medicinais, pavimentação, iluminação e aquecimento.

Desde 1882 é possível gerar eletricidade queimando combustíveis fósseis. Qualquer combustível sólido, líquido ou gasoso poderia ser queimado, seu calor liberado usado para converter água em vapor e o vapor usado para girar geradores e produzir eletricidade.

Assim como a máquina a vapor foi decisiva para o advento do carvão como fonte de energia, o motor a combustão exerceu papel semelhante com o uso dos derivados do petróleo. A descoberta de um vetor energético como a eletricidade e a invenção das máquinas elétricas no século XIX, juntamente com a produção dos veículos automotores, quando Henry Ford lançou a linha de montagem em movimento e inaugurou a era da produção em massa, lançaram as bases para a introdução da moderna sociedade de consumo, caracterizada por uma intensidade energética nunca vista na história da humanidade (Hobsbawn, 1999). Os EUA estavam iniciando a segunda revolução industrial, acompanhada da segunda transição energética do carvão para o petróleo.

Os combustíveis fósseis tornaram os usos diretos tradicionais de calor mais difundidos e mais eficientes. Várias invenções fundamentais tornaram possível converter energia térmica da queima de combustíveis fósseis em energia mecânica. Isso foi feito primeiro em motores a vapor e de combustão interna, depois em turbinas a gás.

Os baixos preços do petróleo também aceleraram a transição do carvão em vários países asiáticos e latino-americanos. As décadas de 1950 e 1960 foram períodos recordes para a descoberta de campos petrolíferos com grande potencial para exploração. Essas descobertas incluíram campos na Arábia Saudita, Iraque, Irã, Canadá, Estados Unidos e na Sibéria.

As descobertas na Argélia, Líbia e Nigéria transformaram a África em um novo fornecedor importante e um campo petrolífero Daqing em Heilongjiang (descoberto em 1959) foi o marco do petróleo da China (Smil, 2010).

O tamanho dos campos de petróleo do Oriente Médio e a disponibilidade imediata de investimentos ocidentais (e mais tarde também japoneses) trouxeram aumentos de extração rápidos: a produção saudita (toda gerida pela *Arabian American Oil Company*) triplicou entre

1960 e 1970 (de 62 para 192 Mt<sup>5</sup> / ano), enquanto a produção do Kuwait passou de menos de 1 Mt em 1945 para mais de 80 Mt em 1960 (Smil, 2010).

A insatisfação com os preços baixos do petróleo resultantes do cartel das “Sete Irmãs”<sup>6</sup> levou ao estabelecimento da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) em 1960. Como a demanda por petróleo continuou a crescer enquanto a produção dos Estados Unidos começou a cair em 1971 (permaneceu a maior do mundo até 1975), a Opep começou a aumentar seus preços (Smil, 2010).

O aumento dos preços provocados pela Opep fomentou a primeira crise do petróleo em 1973. A segunda crise do petróleo, em 1979, foi marcada por conflitos geopolíticos. A Guerra do Yom Kippur e a Revolução Iraniana provocaram interrupções nas exportações de petróleo do Oriente Médio. Assim, os problemas de interferências nos preços e instabilidades geopolíticas incentivaram os países consumidores a investir na exploração interna e em alternativas ao petróleo.

Ao mesmo tempo, as descobertas de campos petrolíferos gigantes estavam diminuindo, mas incluíam o Complexo Cantarell do México em 1976 e os três maiores campos nas águas norueguesas do Mar do Norte (Smil, 2010). A produção global de petróleo atingiu o pico de pouco mais de 3,2 Gt em 1979 e não ultrapassou esse nível até 1994 (Smil, 2017). Os preços permaneceram relativamente estáveis até o início dos anos 2000.

Novas descobertas importantes da década de 1990 vieram do México, Irã, Brasil e das águas offshore dos EUA no Golfo do México. Nesse período, com a dissolução da União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), o maior produtor mundial de petróleo desde 1975, a extração total de petróleo diminuiu em quase um terço entre 1991 e 1996, tornando a Arábia Saudita um novo líder de produção a partir de 1993. Os preços permaneceram baixos e estáveis e a extração total aumentou modestamente até 2005 (Smil, 2017).

Devido às duas crises do petróleo, os países europeus entraram em uma crise financeira ocasionada pela alta dos preços. Para suprir a necessidade de energia elétrica, investiram massivamente em usinas nucleares. Desde 1956, países geram energia elétrica a partir da fissão do isótopo de urânio.

Entretanto, acidentes graves como o de Chernobyl na Ucrânia em 1986 despertaram alertas para os riscos das usinas e seus rejeitos. As termelétricas também foram a solução

---

<sup>5</sup> Mt - Megatonne (10<sup>12</sup>).

<sup>6</sup> Grupo formado por sete empresas americanas e europeias de petróleo: Esso (atualmente ExxonMobil), Texaco, Socal (Chevron), Gulf Oil, Shell e a Amoco (atual BP) para controlarem o mercado petrolífero e impor baixos preços aos países produtores enquanto garantiam altas taxas de lucro.

encontrada para atender a demanda energética. Os países que possuíam potencial para produção hidrelétrica implantaram plantas que ofereciam energia elétrica a um custo reduzido ao consumidor final. Entretanto, a implantação das usinas foi frequentemente acompanhada por conflitos socioambientais relacionados à inundações de grandes áreas de vegetação nativa, deslocamento de comunidades e alterações no ecossistema dos rios com os barramentos. Os investimentos em energia eram crescentes e proporcionais ao crescimento das cidades e das indústrias.

Assim, as duas primeiras revoluções industriais promoveram, principalmente, o acúmulo de capital e intensificação da urbanização. Essas foram condições para, na segunda metade do século XX, o surgimento da revolução técnica-científica-informacional, que corresponde à evolução dos processos de produção e reprodução do meio geográfico iniciando a Terceira Revolução Industrial.

Depois da Segunda Guerra Mundial, o mundo ingressou em uma etapa de evoluções no campo tecnológico desencadeada principalmente pela junção entre conhecimento científico e produção industrial. Nesse período, a energia elétrica tornou-se fundamental para impulsionar as inovações e incluir um maior número de pessoas nas mudanças que se sucediam.

O processo industrial pautado no conhecimento e na pesquisa caracteriza a chamada Terceira Revolução Industrial. Nessa etapa ou fase produtiva, todos os conhecimentos gerados em pesquisas foram repassados quase que simultaneamente para o desenvolvimento industrial. Esta Revolução Industrial ou Revolução técnico-científica permitiu o desenvolvimento de atividades na indústria que aplicam tecnologias de ponta em todas as etapas produtivas.

Nesse sentido, as atividades que mais se destacaram no mercado estão vinculadas à produção de computadores, softwares, microeletrônica, chips, transistores, circuitos eletrônicos, além da robótica nas indústrias, informática em geral, transmissores de rádio e televisão, telefonia fixa, móvel e internet, indústria aeroespacial, biotecnologia, dentre outras inovações.

As inovações tecnológicas promoveram uma dinamização produtiva no mundo. Criaram trabalho, produtos e mercadorias de maior qualidade para concorrer em um mercado cada vez mais competitivo, com diminuição de custos e aumento do lucro. Esse processo propiciou uma enorme acumulação de capitais pelos empresários e industriais, usado para investir no desenvolvimento de novos produtos e na geração de tecnologias de ponta para atender demandas da indústria.

Segundo Milton Santos (1996), para descrever esse período, é necessário entender a evolução das transformações do espaço, que vão desde o meio natural, passando pelo meio



técnico, até chegar ao período atual, em que há uma maior inserção das ciências e do meio informacional sobre as formas como ocorrem as produções espaciais. Portanto, as três etapas mencionadas (meio natural, meio técnico e meio técnico-científico-informacional) formam uma periodização do meio geográfico, conforme a sua apropriação pelas atividades humanas. Assim, é estabelecida uma melhor noção das relações entre natureza e sociedade ao longo do tempo.

O meio natural corresponde ao período em que o emprego das técnicas esteve diretamente vinculado à dependência sobre a natureza, da qual o homem fazia uso sem propiciar grandes transformações. Assim, as ações de interferência sobre o meio eram, sobretudo, locais, e a participação das atividades antrópicas, bem como as suas transformações, era limitada pela harmonização e preservação da própria natureza. Até a primeira revolução industrial, este era o cenário da relação homem-natureza.

Santos (1996) utilizou como exemplos do conceito de meio natural as técnicas de pousio, rotação de culturas e agricultura itinerante, em que o uso do solo se limitava à sua preservação para manter um equilíbrio entre uso e preservação da natureza.

O meio técnico representa a emergência do espaço mecanizado, com a introdução de objetos e sistemas que provocaram a inserção das tecnologias no meio produtivo. É possível citar como exemplo mais determinante a Primeira Revolução Industrial, mesmo que antes disso já houvesse algumas técnicas em que a atuação mecânica existisse e agisse sobre o meio geográfico.

Assim, nesse período, ocorreu uma crescente forma de substituição ou de sobreposição dos objetos técnicos sobre os objetos culturais e naturais, mesmo que essa substituição não tenha se manifestado de forma igualitária, justa e homogênea nas diferentes regiões e territórios. Nesse momento, a divisão internacional do trabalho foi intensificada, bem como a dependência das atividades humanas sobre o uso de maquinários e instrumentos.

Para o autor, o meio técnico-científico-informacional representa, então, a atual etapa na qual se encontra o sistema capitalista de produção e transformação do espaço geográfico, estando relacionado, sobretudo, à Terceira Revolução Industrial, que passou a ser reconhecida como Revolução científica informacional, cujo impacto manifestou-se de forma mais intensa a partir dos anos 1970.

Nesse período, ocorreu uma união entre técnica e ciência, guiadas pelo funcionamento do mercado, que, graças aos avanços tecnológicos, expande-se e consolida o processo de globalização. Assim, esse processo só se manifesta em seu atual estágio devido aos avanços propiciados pelo meio técnico-científico-informacional (Santos, 1996).

A internet foi o principal marco deste período. Com a rede mundial foi possível a digitalização dos processos e mudanças profundas com as Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs). A vida em sociedade passou a ser altamente digitalizada e a demanda de energia cada vez maior.

Rifkin (2012) fornece outra abordagem sobre as revoluções industriais. Para esse autor, a segunda revolução industrial e o fim da Era do petróleo ocorreram em julho de 2008 quando o preço do petróleo chegou ao recorde de US\$147 por barril. Essa alta do preço aumentou o preço de todos os produtos que utilizam combustíveis fósseis como insumo, tais como: fertilizantes, pesticidas, cimento, plásticos, produtos farmacêuticos, fibras sintéticas da indústria de vestuário e combustível veicular. Esse seria o real motivo da crise econômica e financeira iniciada nos EUA em 2009.

Para esse autor, as grandes transformações econômicas na História ocorrem quando uma nova tecnologia de comunicação se torna um meio de organizar e gerenciar as civilizações viabilizado por novas fontes de energia. Surge, assim, um fio condutor estabelecido pela matriz energia-telecomunicações que ascende, se estabiliza e descende. Atualmente as sociedades encontram-se frente à convergência da tecnologia da comunicação da internet com as energias renováveis geradas e compartilhadas por cada usuário da rede de internet (Rifkin, 2012).

Ainda para o autor, uma Terceira Revolução Industrial estaria calcada em cinco pilares interconectados. Esses pilares são: 1) mudança para a energia renovável; 2) microgeração de energia distribuída; 3) emprego do hidrogênio e tecnologias de armazenamento de energia; 4) compartilhamento de energia e 5) transição para frota de veículos elétricos.

Embora apresente outra abordagem, a análise deste pesquisador sobre a Terceira Revolução Industrial é convergente com os aspectos principais da Terceira Transição Energética. No início do século XXI, os sinais de uma Quarta Revolução Industrial, baseada na eletrificação, substituiu grande parte da infraestrutura dependente dos combustíveis fósseis e define os contornos de uma Terceira Transição.

### **1.3 A Terceira Transição Energética**

As primeiras pesquisas sobre terceira revolução ou transição energética datam da década de 1950. Esses estudos tiveram foco em oferta e demanda de energia e em mudanças tecnológicas. É interessante notar que a primeira discussão sobre as transições de energia surgiu de exercícios ousados em cenários futuros, e não de relatos históricos (Grublerab, 2012). Para Schwab (2016), do Fórum Econômico Mundial, os países mais desenvolvidos experimentam a

quarta revolução industrial, que está calcada na inteligência artificial, robótica, internet das coisas, veículos autônomos, impressão em 3D, nanotecnologia, biotecnologia e armazenamento de energia, principalmente. A diferença em relação às revoluções anteriores consiste na amplitude, a fusão de tecnologias e a interação entre os domínios físicos, digitais e biológicos.

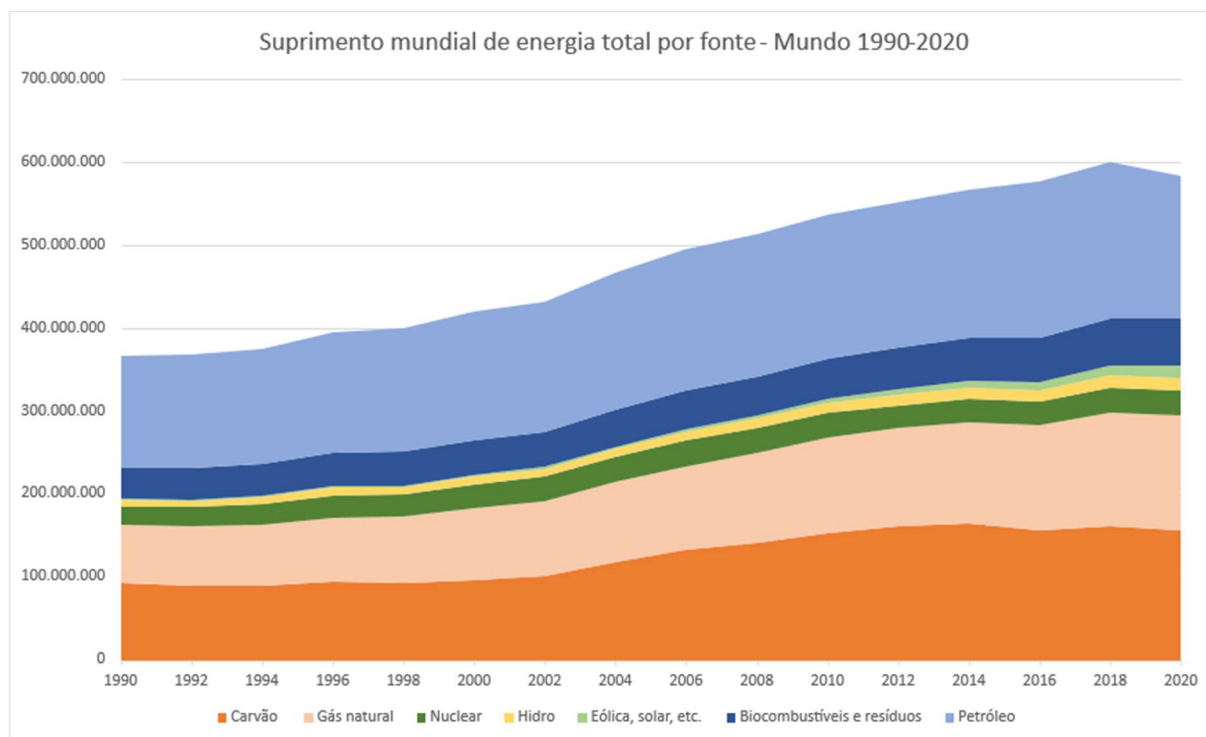
A quarta revolução industrial ou Indústria 4.0 está voltada para os sistemas “de Produção Ciber-Físicos”, nos quais sensores acionam as máquinas. Os processos devem governar a si mesmos num sistema modular descentralizado. Essa nova revolução está no início e muitas mudanças estão acontecendo (Arktis, 2015).

Os formuladores de políticas (Huhne, 2011) e analistas acadêmicos (Stern, 2011a, Stern, 2011b, Stern, 2012 *apud* Pearson & Foxon, 2012) argumentaram que uma transição de baixo carbono poderia assumir a forma de uma "revolução industrial de baixo carbono". Primeiro, que a escala das mudanças nas tecnologias, instituições e práticas necessárias para mitigar as emissões de gases de efeito estufa e as mudanças climáticas é comparável à escala das mudanças experimentadas nas revoluções industriais anteriores. Em segundo lugar, os ganhos de produtividade e benefícios de bem-estar econômico decorrentes de uma transição de baixo carbono seriam semelhantes aos das revoluções anteriores, tornando uma transição de baixo carbono econômica e ambientalmente desejável.

No setor energético há um processo de mudança nesse início do século XXI. Esta transição é impulsionada pelas oscilações no mercado de petróleo, as sucessivas crises geopolíticas entre países produtores e consumidores e riscos para segurança energética e as emissões de GEE, em parte oriundas da queima de combustíveis fósseis, que contribuem para poluição do ar e para as mudanças climáticas. Outros aspectos relacionados à transição referem-se às inovações tecnológicas e novas formas de produção, a necessidade de segurança e eficiência energética ensejam um incremento nas energias renováveis, uma tendência a descarbonização da economia e a geração descentralizada de energia com o uso de novas tecnologias.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), em 2019, 81,1% da matriz energética global era composta por combustíveis fósseis, sendo carvão (27,0%), petróleo e derivados (31,1%), gás natural (23,0%). Outros 18,9% da matriz são compostos por 5,0% energia nuclear; 9,3% biomassa; 2,6% hidráulica e 2,0% outros (Gráfico 1).

**Gráfico 1 – Suprimento mundial de energia total por fonte em terajoule (TJ)**



Fonte: elaborado com dados da IEA (2021).

Importante ressaltar que, desde 1994, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – CQNUMC (*United Nations Framework Convention on Climate Change* – UNFCCC) estabeleceu como objetivo final, a estabilização das concentrações atmosféricas de Gases de Efeito Estufa em níveis seguros dentro de um prazo que permita aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente à mudança do clima (artigo 2º) (UNFCCC, 1992).

Por meio dessa Convenção, contando com a participação de 180 países e a União Europeia, as Nações Unidas reconheceram as Mudanças Climáticas como um problema real e global. Dentre os compromissos esperados, a CQNUMC estabelece como princípio, a necessidade do compartilhamento do ônus nas ações contra a mudança do clima.

O Anexo I da Convenção do Clima é integrado pelas partes signatárias da convenção e pelos países industrializados da antiga União Soviética e do Leste Europeu. Já a divisão entre partes Anexo I e partes não Anexo I segmenta esses países segundo a responsabilidade pelo aumento da concentração atmosférica de gases de efeito estufa.

As partes Anexo I são aquelas com uma responsabilidade maior – basicamente os países desenvolvidos – e possuem metas de limitação ou redução de emissões de GEE. Outro compromisso adotado foi o Protocolo de Quioto (1999) pela redução das emissões de GEE. O Protocolo, com entrada em vigor em 2005, e com prazo até 2020, previa limites de emissão e

de redução dos gases de efeito estufa entre 5,2% e 8% para os países Anexo B (os países desenvolvidos e os países europeus em desenvolvimento) e mecanismos que, utilizados por eles e pelos países não listados, criariam um círculo virtuoso de redução global das emissões de GEE. Não foram estabelecidas metas de redução para os países não listados.

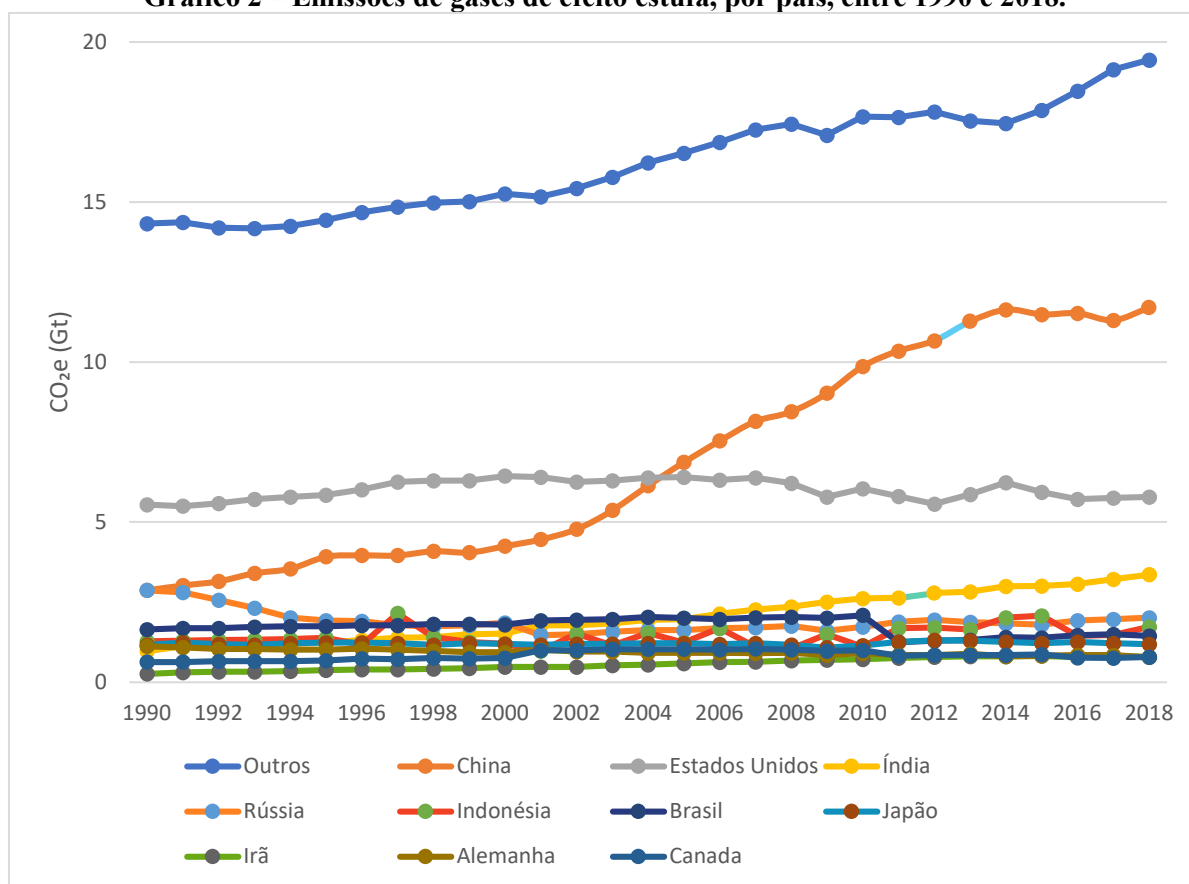
Com a dificuldade de implantação e a necessidade de resultados mais claros, a COP-21, realizada em Paris, aprovou em 12 de dezembro de 2015 novo tratado para redução da emissão dos GEE a partir de 2020. Conhecido como Acordo de Paris, 195 países comprometeram-se a reduzir a emissões de GEE, sendo o principal gás o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

O Acordo de Paris tem como principal objetivo reduzir as emissões de gases de efeito estufa para limitar o aumento médio de temperatura global a 2°C, quando comparado a níveis pré-industriais. O Acordo envolve metas e orientações, tais como (UNFCCC, 2015):

- esforços para limitar o aumento de temperatura a 1,5°C;
- recomendações quanto à adaptação dos países signatários às mudanças climáticas, em especial para os países menos desenvolvidos, de modo a reduzir a vulnerabilidade a eventos climáticos extremos;
- estimular o suporte financeiro e tecnológico por parte dos países desenvolvidos para ampliar as ações que levam ao cumprimento das metas para 2020 dos países menos desenvolvidos;
- promover o desenvolvimento tecnológico e transferência de tecnologia e capacitação para adaptação às mudanças climáticas;
- proporcionar a cooperação entre a sociedade civil, o setor privado, instituições financeiras, cidades, comunidades e povos indígenas para ampliar e fortalecer ações de mitigação do aquecimento global.

Segundo dados do *Climate Watch Data*, em 2018, os principais países emissores de GEE são China, EUA e Índia. Entretanto, um bloco de países com contribuições menores alcançou quase 20 Gt de emissões de CO<sub>2</sub> (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Emissões de gases de efeito estufa, por país, entre 1990 e 2018.



Fonte: Elaborado com dados Climate Watch Data (2018).

Nesse sentido, países têm anunciado medidas impactantes para descarbonizar<sup>7</sup> o setor energético. Destacam-se, sobretudo, os seguintes compromissos:

- Alemanha: abandono do carvão como combustível para geração de energia até 2038. Desativação de todas as usinas nucleares do país até 2022 (Germany, 2022).
- União Europeia: 80% da eletricidade será de energias renováveis em 2050. Zero líquido até 2050 (EU, 2022).
- China: Zero líquido até 2060. Considerando que o setor de energia é a fonte de quase 90% das emissões de gases de efeito estufa da China, a eletrificação de veículos é pilar importante para a descarbonização no país (IEA, 2021).
- EUA: retorno ao Acordo de Paris e suspensão de vendas de petróleo e gás em propriedades públicas e redução dos subsídios à produção de combustíveis fósseis (White House, 2023).

<sup>7</sup> Reduzir suas emissões de carbono.

- Índia: até 2030, 40% da energia elétrica seja proveniente de outras fontes que não combustíveis fósseis e um esforço para reduzir a intensidade das emissões em 33%-35% até 2030 (quando comparado com os níveis de 2005), Zero líquido até 2070 (Índia, DST, 2023).

Considerando que China, EUA e Índia são os maiores emissores de GEE, as medidas anunciadas são cruciais para atingir a ambição do Acordo de Paris. Entretanto, o que se observa é um direcionamento para a intensificação ao uso de recursos naturais e, principalmente, um prognóstico de aumento da demanda de energia e inserção dos novos mercados no cenário global, como dos países africanos e do leste asiático.

Entretanto, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), em um cenário de retomada dos efeitos da pandemia de Covid-19, a demanda por todos os combustíveis fósseis deve crescer significativamente em 2021. A demanda por carvão sozinha deve aumentar em 60% mais do que todas as energias renováveis combinadas, sustentando um aumento nas emissões de quase 5%, ou 1.500 Mt. Este aumento esperado reverteria 80% da queda em 2020, com as emissões terminando apenas 1,2% (ou 400 Mt) abaixo dos níveis de emissões de 2019.

A demanda de eletricidade deve aumentar 4,5% em 2021, ou mais de 1 000 TWh. Isso é quase cinco vezes maior do que o declínio em 2020, ocasionado por medidas de isolamento devido à pandemia, consolidando a participação da eletricidade na demanda de energia final acima de 20%. Quase 80% do aumento projetado na demanda em 2021 ocorreu nos mercados emergentes e nas economias em desenvolvimento, com a China sozinha respondendo por metade do crescimento global. A demanda nas economias avançadas permanece abaixo dos níveis de 2019 (IEA, 2021).

A pandemia de Covid-19 provocou uma retração da demanda de energia em 2020 (IEA, 2021). Neste contexto, o cenário de crise econômica favorece que energias mais baratas ganhem destaque no período de retomada. Assim, a pandemia inseriu muitas incertezas nos cenários energéticos, principalmente no que se refere à velocidade da Terceira Transição Energética.

Em um estudo publicado pelo *Natural Resources Defense Council* (NRDC, 2019) para os Estados Unidos, entre 2009 e 2017, o custo nivelado de produção de energia eólica e solar diminuiu em 67% e 86%, respectivamente, possibilitando superar a concorrência de outras tecnologias de geração em muitas regiões e quadruplicar sua participação nacional na energia fornecida. Ao longo dos próximos dez anos, os custos das energias eólica e solar deverão cair ainda mais.

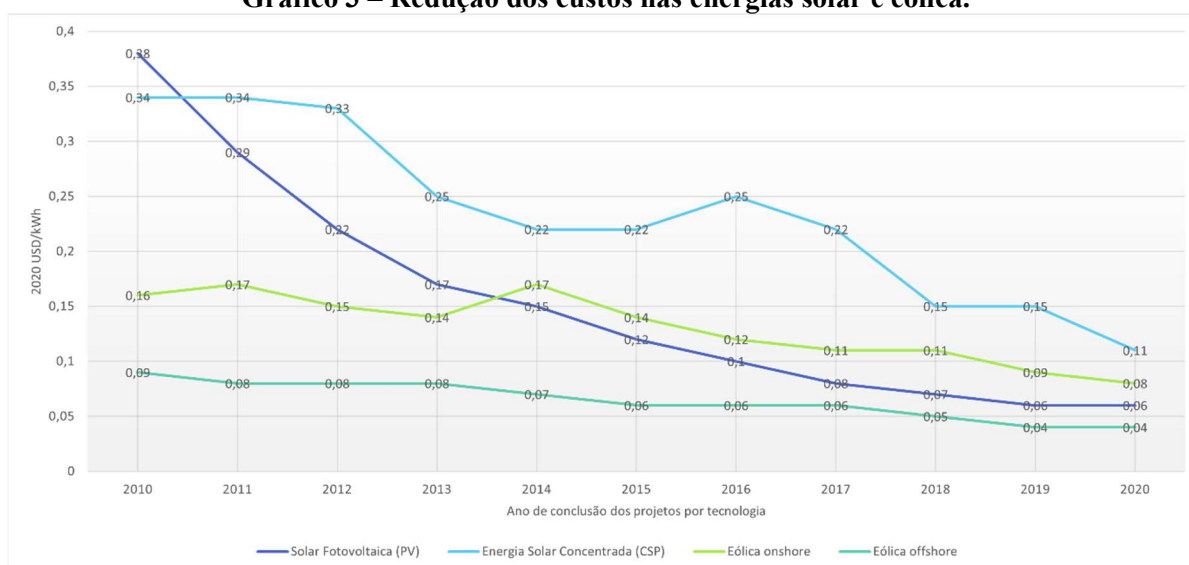
O estudo conclui que mesmo sem uma nova política que favoreça a energia limpa, esses resultados demonstram a crescente força e acessibilidade da energia eólica e solar. De 2021 em

diante, a energia eólica e a solar são as duas fontes mais baratas de nova energia nos EUA, mesmo com a suspensão ou diminuição dos créditos fiscais federais. As tecnologias renováveis a partir de 2020 já seriam o recurso de menor custo. Em 2030, elas serão a opção mais acessível nos EUA (NRDC, 2019). No nível global, entre 2008 e 2018, as tecnologias de energia limpa tiveram uma redução de custo entre 50% e 90%. Com essas reduções, as energias renováveis passaram a atrair investimentos, pesquisas e mercado consumidor.

No que se refere à geração, a expectativa para os próximos anos é de uma competitividade ainda maior entre renováveis e combustíveis fósseis. As tecnologias eólica, solar e baterias são agora mais baratas do que as tecnologias convencionais e fósseis. Em Portugal, em 2019, o leilão de energia bateu o recorde global de 14 euros o MWh. No Brasil, o presidente do Operador Nacional do Sistema elétrico declarou “o fim das hidrelétricas”, considerando a competitividade dos custos das outras renováveis em relação aos grandes projetos hidrelétricos (ENASE, 2019).

Um relatório da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2021) mostra que 162 gigawatts (GW) ou 62 por cento da geração total de energia renovável adicionada em 2020 teve custos mais baixos do que a opção de combustível fóssil mais barata. Os custos das tecnologias renováveis continuaram a cair significativamente ano a ano (Gráfico 3). A energia solar concentrada (CSP) caiu 16 por cento, a energia eólica *onshore* em 13 por cento, a energia eólica offshore em 9 por cento e a energia solar fotovoltaica em 7 por cento.

**Gráfico 3 – Redução dos custos nas energias solar e eólica.**



Fonte: elaborado com dados IRENA (2021).



Entre 2010-2020 houve uma melhoria na competitividade das tecnologias solar e eólica com CSP, energia eólica *offshore* e energia solar fotovoltaica, todos se juntando à energia eólica *onshore* na faixa de custos para a capacidade de novos combustíveis fósseis. Em dez anos, o custo da eletricidade da energia solar fotovoltaica em grande escala caiu 85 por cento, o da CSP em 68 por cento, o da energia eólica *onshore* em 56 por cento e 48 por cento no caso da energia eólica *offshore*. Com preços de leilão recorde de US\$ 1,1 a 3 centavos por kWh em 2021, a energia solar fotovoltaica e a energia eólica *onshore* são mais competitivos até mesmo em relação à opção de carvão mais barata, sem qualquer subsídio (IRENA, 2021).

O relatório da IRENA (2021) também mostra que as novas energias renováveis superam as usinas de carvão existentes também em custos operacionais. Nos Estados Unidos, 149 GW ou 61 por cento da capacidade total de carvão custa mais do que a nova capacidade renovável. A aposentadoria e substituição dessas usinas por energias renováveis reduziria as despesas em US\$ 5,6 bilhões por ano e evitaria 332 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, reduzindo as emissões do carvão nos Estados Unidos em um terço. Na Índia, 141 GW de carvão instalado é mais caro do que a nova capacidade renovável. Na Alemanha, nenhuma usina de carvão existente tem custos operacionais mais baixos do que a nova energia solar fotovoltaica ou a capacidade eólica *onshore*.

Globalmente, mais de 800 GW de energia a carvão existente custa mais do que novos projetos solares fotovoltaicos ou eólicos *onshore* comissionados em 2021. A substituição dessas usinas reduziria os custos de geração de energia em até US\$ 32,3 bilhões anuais e evitaria cerca de 3 gigatoneladas de CO<sub>2</sub> por ano, o que corresponde a 9 por cento das emissões globais de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia em 2020 ou 20 por cento da redução de emissões necessária até 2030 para um caminho climático de 1,5 ° C (IRENA, 2021).

A perspectiva até 2022 mostra os custos globais de energia renovável caindo ainda mais, com a energia eólica *onshore* se tornando 20-27 por cento menor do que a nova opção de geração a carvão mais barata. 74 por cento de todos os novos projetos solares fotovoltaicos comissionados nos próximos dois anos que foram adquiridos de forma competitiva por meio de leilões e licitações terão um preço inferior às novas plantas a carvão. A tendência confirma que as energias renováveis de baixo custo não são apenas a espinha dorsal do sistema elétrico, mas também permitirão a eletrificação em usos finais como transporte, edifícios e indústria e desbloquearão a eletrificação indireta competitiva com hidrogênio renovável.

Em 2020, a energia a partir de fontes renováveis registrou recorde na adição de nova capacidade de geração. Segundo dados da IRENA (2021) o volume superou as estimativas

anteriores, apesar da desaceleração econômica resultante da pandemia. O mundo adicionou mais de 260 GW em 2020, superando a expansão em 2019 em cerca de 50%. Mais de 80% de toda a nova capacidade de eletricidade adicionada no ano passado era renovável, com a energia solar e eólica respondendo por 91% das novas energias renováveis.

A crescente participação das energias renováveis no total é parcialmente atribuível ao descomissionamento de usinas a partir de combustíveis fósseis na Europa, América do Norte e pela primeira vez na Eurásia (Armênia, Azerbaijão, Geórgia, Rússia e Turquia). O total de adições de combustível fóssil caiu para 60 GW em 2020 de 64 GW no ano anterior, destacando uma tendência contínua de redução da expansão dos combustíveis fósseis (IRENA, 2021).

A eólica alcançou recorde de 93 GW de nova capacidade em 2020. A indústria eólica global alcançou um aumento de 53% de capacidade em relação ao ano anterior, mostrando forte resiliência em relação à pandemia de Covid-19. No mercado *onshore* foram instalados 86,9 GW, um aumento de 59% em relação a 2019. Além da China e dos Estados Unidos, os cinco principais mercados eólicos *onshore* foram Brasil (2,30 GW), Noruega (1,53 GW) e Alemanha (1,43 GW). No *offshore*, 2020 foi o segundo melhor ano da história, com 6,1 GW comissionados em todo o mundo. Metade da nova capacidade foi instalada pela China. Com isso, 4,8% da capacidade eólica é *offshore* (35 GW) (GWEC, 2021).

Nesse contexto, as perspectivas são favoráveis ao processo de descarbonização da matriz energética global. O início da década de 2020 é marcada pela alta do petróleo e as preocupações a respeito das mudanças climáticas, que podem favorecer uma rápida transição para países desenvolvidos.

Diamond (2005) já alertava que as principais ameaças à humanidade seriam a utilização de armas nucleares, as mudanças climáticas, o esgotamento dos recursos naturais e as desigualdades sociais. Para Harari (2018), que também cita Diamond em seus trabalhos (Harari, 2016), os principais temas da agenda global no século XXI são a guerra nuclear, mudanças climáticas e as tecnologias disruptivas. A cada dia que passa a tecnologia parece evoluir para oferecer a solução para os problemas específicos da humanidade. Entretanto, o esgotamento dos recursos naturais e as mudanças climáticas se agravam e representam uma preocupação sobre o futuro das condições de vida no planeta.

## **Conclusão**

A história das transições energéticas demonstra que alguns aspectos foram cruciais em determinar as mudanças que ocorreram na matriz energética global. A primeira transição foi

configurada pela disponibilidade e acessibilidade à lenha para gerar energia, mas foi a necessidade de eficiência, o aumento da demanda, a escassez de lenha, as inovações tecnológicas, entre outros, que impulsionaram a transição para o carvão.

A descoberta do petróleo e as inovações utilizando essa fonte de energia foram popularizadas e, embora o carvão seja atualmente um combustível fundamental em alguns países, o aumento da demanda, a busca por eficiência, a escassez de carvão, as inovações tecnológicas, o mercado de trabalho, a viabilidade econômica e o baixo preço do petróleo favoreceram para que a segunda transição fosse inevitável.

Entretanto, diante da constatação de dependência de um recurso finito, o petróleo, os conflitos geopolíticos em torno dessa *commodity*, as crises relativas ao preço, a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, a ascensão das energias renováveis como alternativa limpa e de custo inferior, a tendência de eletrificação e as inovações tecnológicas em curso são os aspectos cruciais que caracterizam os debates a respeito da terceira transição energética do século XXI. Além disso, adicionam-se a esses aspectos os efeitos da pandemia de Covid-19 no setor energético. Esses aspectos serão analisados em detalhe no próximo capítulo.

## Referências

ALLEN, R. **The British Industrial Revolution in Global Perspective**. Cambridge University Press, Cambridge, 2009.

ARKTIS. **Indústria 4.0, a quarta revolução industrial**, 2015. Disponível em: ><http://arktis.com.br/a-quarta-revolucao-da-industria>. Acesso em 18 julho de 2019.

CLIMATE WATCH DATA. **Historical GHG Emissions**, 2018. Disponível em: [https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end\\_year=2018&start\\_year=1990](https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2018&start_year=1990). Acessado em: junho de 2021.

CRUTZEN, P. J. & STOERMER, E. F. **The Anthropocene**. IGBP Global Change News. Nature.41, 17–18, 2000. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature14258>. Acessado em: 14 de fevereiro de 2018.

DIAMOND, J. **Colapso: Como as sociedades escolhem o sucesso ou o fracasso**. Ed. Record, 2005. 684p.

EUROPEAN COMMISSION. **Institute for Security Studies. Global trends 2030: citizens in an interconnected and polycentric world**. Paris: Euiss/Espas, 2011.

\_\_\_\_\_. **Communication from the commission to the european parliament, the european council, the council, the european economic and social committee and the committee of**

**the regions. REPowerEU Plan.** Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483>. Acessado em: nov/2022.

GELLER, Howard Steven. **Revolução Energética - Políticas para um Futuro Sustentável.** Editora RelumeDumara, Rio de Janeiro, 2003.

GREENPEACE, **Global energy [r]evolution a sustainable global energy outlook**, 2010. Disponível em: Acesso em: 15 de outubro de 2018.

GERMANY, The Federal Government. **Climate Action Programme 2030** (2022). Disponível em: <https://www.bundesregierung.de/breg-en/issues/climate-action>. Acessado em: nov/2022.

GWEC. **Global Wind Report 2021.** Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>. Acessado em: abr/21.

HARARI, Y.N. **Homo Deus.** Ed. Companhia das letras, São Paulo, 2016.

HOBSBAWM, E. J. **Industry and Empire: From 1750 to the Present Day**, rev. and updated with Chris Wrigley, 2nd ed., New York: New Press. ISBN 1-56584-561-7, 1999.

\_\_\_\_\_. **A Era das Revoluções.** Europa 1789-1848. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1982.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy Review 2021.** Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021?mode=overview>. Acessado em junho de 2021.

\_\_\_\_\_. **An energy sector roadmap to carbon neutrality in China**, (2021), Paris, Disponível em: <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>, License: CC BY 4.0

INDIA, DST. **National Action Plan on Climate Change (NAPCC)** (2008). Disponível em: <https://dst.gov.in/climate-change-programme>. Acessado em: jan/2023.

IRENA. **Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050**, Abu Dhabi, 2020.

\_\_\_\_\_. **Renewable Capacity Statistics 2021.** March 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>. Acessado em: abr/21.

\_\_\_\_\_. **Energy transition outlook** (2021). Disponível em: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Outlook>. Acessado em dezembro de 2022.

\_\_\_\_\_. **Transforming the energy system – and holding the line on the rise of global temperatures**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IPCC. **Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and

C.A. Johnson (eds.]). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2011.881pp.

\_\_\_\_\_. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.

\_\_\_\_\_. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp., 2014.

\_\_\_\_\_. **Summary for Policymakers (SR 1.5)** approved at the First Joint Session of Working Groups I, II and III of the IPCC and accepted by the 48th Session of the IPCC, Incheon, Republic of Korea, 6 October 2018.

\_\_\_\_\_. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896, 2021.

KPMG INTERNATIONAL. **Future State 2030: the global megatrends shaping governments**. Toronto: KPMG, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/vST7ST>>. Acessado em: 17 fev. 2014.

MOKYR, J. **The Enlightened Economy**. Penguin Books, London, 2009.

NASDAQ. **Crude Oil Prices from 1861, 2021**. Disponível em: [https://data.nasdaq.com/data/BP/CRUDE\\_OIL\\_PRICES-crude-oil-prices-from-1861](https://data.nasdaq.com/data/BP/CRUDE_OIL_PRICES-crude-oil-prices-from-1861). Acessado em: abril/22.

NRDC. **New NRDC Tool Compares Electric Generation Cost by Resource, 2019**. Disponível em: <https://www.nrdc.org/experts/madhur-bolloor/new-nrdc-tool-compares-electric-generation-cost-resource>. Acessado em: abril/21.

ODUM, E.P. **Fundamental of Ecology**. 3rd Edition, W.B. Saunders, Philadelphia, 1971.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Environmental outlook to 2050: executive summary**. Paris: OECD Publishing, 2012. v. 1. Disponível em: <<http://goo.gl/KrT4Mb>>. Acessado em: abril/21.

PEARSON, Peter J.G. , FOXON, Timothy J. A low carbon industrial revolution? Insights and challenges from past technological and economic transformations. **Energy Policy**. Volume 50, November 2012, Pages 117-127.

REN21. **Renewables Global Futures Report: Great debates towards 100% renewable energy**. Paris: REN21 Secretariat, 2017.

RIFKIN, J. **The Third Industrial Revolution**. Palgrave Macmillan. 304 págs, 2012.

REVOLUÇÃO. *In*: HOUAISS, 2023. Disponível em: <[https://houaiss.uol.com.br/corporativo/apps/uol\\_www/v6-1/html/index.php#2](https://houaiss.uol.com.br/corporativo/apps/uol_www/v6-1/html/index.php#2)>. Acesso em 25/11/2023.

SACHS, I. **A revolução energética do século XXI. Estudos Avançados**. 21 (59): 21–38. 2007.

\_\_\_\_\_. **Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.

SANTOS, Milton. **A Natureza do Espaço. Técnica e Tempo. Razão e Emoção**. Hucitec, São Paulo, 1996.

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SHELL. **Cenários sob novas lentes: mudanças de perspectiva para um mundo em transição**. Rio de Janeiro: Shell, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/FzDN9S>>. Acesso em: 17 fev. 2014.

SHELL. **Scenarios: An Explorer's Guide, Exploring the Future**, London: Shell International Limited, 2003.

SMIL, Vaclav. **Energy and civilization: a History**. Cambridge, MA: The MIT Press, 2017.

\_\_\_\_\_. **Energy Transitions: Global and National Perspectives**. Editora Praeger, 2016.

STEFFEN, W.L. et al. **Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure**. Stockholm : IGBP Secretariat, 2004.

TESKE, Sven. [R] **Evolução Energética**. Erec (Conselho Europeu de Energia Renovável); GWEC (Conselho Internacional de Energia Eólica); Greenpeace Internacional, 2013. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/brasil>. Acessado em 1 junho de 2018.

UNFCCC. **United Nations Framework Convention on Climate Change**, 1992. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>. Acesso em 16 de junho de 2018.

\_\_\_\_\_. **Paris Agreement**, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acessado em: julho de 2019.

UNEP – United Nations Environment Programme. **The GEO-3 scenarios 2002-2032**. Nairobi: Unep, 2004. Disponível em: <<http://goo.gl/79tkwO>>. Acessado em: fev/2019.

WALTER, Osvaldo Luiz. **História de eletricidade**. Mogi Mirim, 2010. Disponível em: <http://univasf.edu.br/~edmar.nascimento/iee/1HistoriaEletricidade.pdf>. Acesso em 21 fev. 2020.

WHITE HOUSE. **Building a clean energy economy Guidebook** (2023). Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/12/Inflation-Reduction-Act-Guidebook.pdf>. Acessado em: jan/2023.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Scenarios: Composing energy futures to 2050 – Executive Summary**. World Energy Council Regency House 1–4 Warwick Street London W1B 5LT United Kingdom, 2013. Disponível em: [www.worldenergy.org/publications/2013/world-energy-scenarios-composing-energy-futures-to-2050](http://www.worldenergy.org/publications/2013/world-energy-scenarios-composing-energy-futures-to-2050).

WORLD ECONOMIC FORUM. **Fostering Effective Energy Transition 2021 edition**. Disponível em: <https://www.weforum.org/reports>. Acessado em: maio/2021.

WRIGLEY, E.A. **Energy and the English Industrial Revolution**. United Kingdom: University Press, Cambridge, 2010.

## Capítulo 2 - Cenários prospectivos, tendências e incertezas globais

### Resumo

A transição energética em curso no século XXI envolve mudanças que preconizam a descarbonização e aumento da eletrificação gerada por tecnologias renováveis no mix de energia. A velocidade dessa transição é especialmente relevante para que as metas de redução de gases de efeito estufa (GEE) pactuadas no Acordo de Paris sejam alcançadas. Entretanto, em 2020 e 2021, o mundo enfrentou uma crise sanitária, econômica e social de grande impacto provocada pela pandemia de Covid-19, que provocou mudanças na economia e ampliou as incertezas ao setor de energia. Os cenários prospectivos destinam-se a identificar como os atores provavelmente agirão no futuro e, assim, fornecem indicadores que orientam tomadas de decisões das partes interessadas. Por isso, cenários são muito utilizados no setor de energia, na medida em que seus investimentos demandam tempo de maturação. O objetivo deste artigo é analisar dados e cenários prospectivos divulgados pela Agência Internacional de Energia (International Energy Agency - IEA), pelo Conselho Mundial de Energia (World Energy Council - WEC) e pela Agência Internacional para as Energias Renováveis (International Renewable Energy Agency - IRENA) sobre os efeitos da pandemia no setor energético e aspectos que influenciam diretamente a velocidade da transição e sua capacidade de contribuir para as metas do Acordo de Paris. A partir da análise das tendências e incertezas inerentes ao setor energético, avalia como a pandemia impacta a transição energética e quais caminhos seguir para a retomada econômica pós-crise. Para tanto, é feito um exercício de escolha de um método de cenários para estudar os futuros plausíveis para a transição energética. O método da Global Business Network (GBN) permite participação coletiva e fornece os passos para uma pesquisa qualitativa, mostrando-se adequada aos objetivos deste capítulo.

**Palavras-Chaves:** Cenários; Transição energética; Global Business Network (GBN).

### Abstract

The ongoing energy transition in the twenty-first century involves changes in the decarbonization of the economy and an increase in the electrification generated by renewable technologies in the energy mix. The speed of this transition is particularly relevant for the greenhouse gas (GHG) reduction targets agreed in The Paris Agreement to be achieved. However, in 2020, the world faced a health, economic and social crisis of great impact caused by the Covid-19 pandemic, which caused changes in the economy and increased the uncertainties for the energy sector. Prospective scenarios are intended to identify how social actors are likely to act in the future and thus provide indicators that guide the decision-making from all stakeholders. Therefore, scenarios are widely used in the energy sector, as far as their investments require maturation time. The aim of this article is to analyze prospective data and scenarios released by the International Energy Agency (IEA), the World Energy Council (WEC) and the International Renewable Energy Agency (IRENA) on the effects of the pandemics on the energy sector and aspects that directly influenced the speed of the transition and its ability to contribute to the Paris Agreement goals. From the analysis of the trends and uncertainties related to the energy sector, it evaluates how the pandemic impacts the energy transition and which paths to follow for the post-crisis economic recovery. For this purpose, an exercise is made to choose a method of scenarios to study what are the reasonable futures for the energy transition. The Global Business Network (GBN) method allows collective participation and provides the steps for a qualitative research, proving to be suitable to the aims of this article.



**Keywords:** Scenarios; Energy transition; Global Business Network (GBN);

## **Introdução**

A transição energética em curso no século XXI envolve mudanças em escala global, mas cada país configura seu setor energético de acordo com as fontes energéticas disponíveis, características da sua população (rural/urbana) e de sua economia, nível de maturidade tecnológica e capacidade de investimentos, dentre outros.

O planejamento estratégico é, tradicionalmente, uma ferramenta chave para o setor de energia. A partir das estimativas de oferta e demanda, o setor utiliza projeções e análises de futuro para traçar suas estratégias de alocação dos recursos, com o intuito de bem atender o mercado consumidor.

Segundo Van der Heijden (2009), o objetivo dos gestores e tomadores de decisão é atingir um resultado melhor por meio de uma abordagem estruturada e eficiente às decisões, a fim de fazer melhor uso do tempo e dos recursos. Para o autor, uma das formas de planejamento é feita por cenários, em que as possibilidades de futuro são levadas em consideração, inserindo as incertezas no processo de planejamento e propiciando uma evolução da aprendizagem sobre o assunto de interesse de uma organização ou sistema.

Os cenários prospectivos destinam-se a identificar como os atores, provavelmente, agirão no futuro. São hipóteses factíveis e coerentes do futuro. Godet (2000) define cenário como um conjunto formado pela descrição de uma situação e do encaminhamento dos acontecimentos que permitem passar da situação de origem a essa situação futura. Para esse autor, existem cenários possíveis, cenários realizáveis e os cenários desejáveis. Um cenário é uma maneira de representar uma realidade futura, com o objetivo de nortear a ação presente, à luz dos futuros possíveis e desejados. Para Michael Porter (1985), cenários são uma consistente visão interna sobre o que o futuro pode ser – não uma adivinhação, mas um resultado futuro possível. Schwartz (2006) define como uma ferramenta para organizar percepções sobre futuros alternativos em que cada decisão deve ser tomada. Em Chermack (2011) o planejamento de cenários é uma ferramenta para revelar suposições de modo que mudanças possam ser feitas na forma como os tomadores de decisão veem o ambiente. É também uma ferramenta para mudar e melhorar a qualidade da percepção das pessoas. A incerteza não é um problema novo, mas o grau de incerteza e os efeitos de resultados imprevistos não têm precedentes. Aprender a ver uma situação – completa com suas incertezas – é uma habilidade importante no mundo de hoje.

Historicamente, os militares fazem uso dos cenários para traçar suas estratégias bélicas. Sun Tzu (2001) já analisava as forças competitivas e os cenários. A estratégia competitiva é um ponto chave para as empresas modernas se manterem no mercado. Com as diferentes mudanças de cenários e o acirramento da competitividade, a estratégia passou a ser relevantes à sobrevivência das empresas em um mercado cada vez mais exigente e incerto. Governos também passaram a incorporar cenários para orientar seus planejamentos de longo prazo.

Para Schwartz (2006), perguntas-chave para uma organização podem ser respondidas com os estudos de cenários, por exemplo: qual seria o comportamento do nosso negócio em cada um dos mundos futuros? Se esse enredo acontecer, quais decisões terão de ser adotadas? Se essa possibilidade se tornar um fato, quais cenários podem ser colocados em andamento?

Os estudos de cenários têm sido utilizados na área de planejamento estratégico, tanto em empresas quanto em governos, por oferecer um referencial de futuros alternativos em face dos quais serão tomadas decisões. E, mais recentemente, tanto em partidos políticos quanto organizações não governamentais e universidades. À medida que aumentam as incertezas em quase todas as áreas de conhecimento, cresce também a necessidade de análise e reflexão sobre as perspectivas futuras da realidade em que se vive e diante da qual se planeja (Buarque, 2003).

Heinzen e Marinho (2018) concluíram em seu trabalho que os métodos de cenários desempenham papel relevante não somente na etapa de formulação da estratégia, mas que podem apoiar tanto o processo de formulação quanto implementação da estratégia, como também para o alinhamento entre a formulação e implementação da estratégia das organizações.

O objetivo desse capítulo é compreender, em uma primeira etapa, o método de cenários e suas aplicações e, a partir de revisão bibliográfica, identificar as principais ferramentas disponíveis para visões de futuro que auxiliam o planejamento estratégico. Em uma segunda etapa, analisar dados divulgados pela Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* - IEA), pelo Conselho Mundial de Energia (*World Energy Council* - WEC) e pela Agência Internacional para as Energias Renováveis (*International Renewable Energy Agency* - IRENA) sobre os efeitos da pandemia no setor energético e aspectos que influenciam diretamente a velocidade da transição e a sua capacidade de contribuir para as metas do Acordo de Paris. Em adição, avaliar como a pandemia do novo coronavírus impacta a transição energética e quais caminhos seguir para retomada pós-crise a partir dos procedimentos metodológicos para elaboração de cenários prospectivos.

Os dados da IEA e IRENA foram analisados por serem os primeiros disponíveis ainda em meados de 2020 e por serem organizações que assessoram seus Estados-membros. Muitos

cenários de petrolíferas ou de organismos internacionais tendem a superestimar demandas futuras ou ser favorável ao setor que projeta os cenários (WEF, 2020).

## 1. As principais escolas e métodos de cenários

Os estudos iniciais em cenários são da década de 1960. Bradfield *et al.* (2005) afirmam que há três abordagens dominantes nos estudos do método de cenários: Lógica Intuitiva (*Intuitive Logics*); Probabilística (*Probabilistic Modified Trend*); e Prospectiva (*La Prospective*).

A Lógica Intuitiva (*Intuitive Logics*) foi proposta por Herman Kahn na *Rand Corporation* na década de 1960 e usada por Pierre Wack (1985) na *Royal Dutch Shell*, sendo referida, muitas vezes, por ‘método Shell’ para cenários. Essa abordagem também é denominada como ‘escola anglo-americana’ de planejamento de cenários, sendo dominante no desenvolvimento de cenários nos Estados Unidos.

Em 1967, a Shell iniciou o estudo 'Ano 2000', para estudar o ambiente de negócios que existiria em 2000. O estudo revelou que haveria uma descontinuidade na indústria do petróleo e que a trajetória histórica de expansão ano a ano da indústria não poderia continuar em 1985, muito menos em 2000. Como consequência dessa revelação, várias empresas da Shell foram incumbidas em 1969 de olhar para o ano de 1985 em uma iniciativa conhecida como exercício de 'Planejamento do Horizonte'.

A escola Probabilística adota a abordagem *Probabilistic Modified Trend* (PMT) cujas bases são os trabalhos da *Rand Corporation* na década de 1950, nos Estados Unidos. Essa abordagem incorpora duas metodologias diferentes, chamadas de *Trend Impact Analysis* (TIA) e *Cross-impact analysis* (CIA). A análise de impacto de tendência (TIA) foi desenvolvida no início dos anos 1970 no campo da pesquisa de futuros e é mais frequentemente associado ao *Futures Group* com sede em Connecticut. A TIA evoluiu do fato de que os métodos tradicionais de previsão dependiam da extrapolação de dados históricos sem considerar os efeitos de eventos futuros sem precedentes (Bradfield *et al.*, 2005). O conceito de TIA é relativamente simples, projetado para modificar extrapolações simples e, em essência, envolve quatro etapas:

1. são reunidos dados históricos relativos ao assunto em análise;
2. um algoritmo é usado para selecionar dados históricos específicos de ajuste de curva e extrapolá-los para gerar tendências futuras;
3. é desenvolvida uma lista de eventos futuros sem precedentes que podem causar desvios da tendência extrapolada; e

4. avaliações de especialistas são usadas para identificar a probabilidade de ocorrência desses eventos inéditos em função do tempo e seu impacto esperado, para produzir extrapolações ajustadas.

A análise de impacto cruzado é o modelo CIA e foi desenvolvido em 1966 na *RAND Corporation* como um jogo de previsão. Desde então, uma série de variantes de impacto cruzado causal e de correlação foi desenvolvida por pesquisadores, juntamente com outras metodologias proprietárias. Embora a TIA e a CIA tenham começado como ferramentas probabilísticas essencialmente autônomas, eles geram uma gama de futuros alternativos em vez de uma extrapolação de dados históricos de um único ponto e, quando combinados com julgamentos e narrativas sobre os eventos nesses futuros, constituem cenários.

A escola francesa, cuja abordagem é Prospectiva (*La Prospective*) foi desenvolvida a partir de 1960 pelo trabalho dos franceses Berger, Masse e Jouvenel na década de 1950, sendo ampliada com os trabalhos de Godet, a partir de 1970 (Bradfield *et al.*, 2005). A principal diferença entre as escolas é a abordagem metodológica, sendo quantitativa e/ou qualitativa.

Em meados da década de 1970, Michel Godet, então chefe do Departamento de Estudos do Futuro da SEMA (empresa atuante no setor de defesa), começou a desenvolver cenários para várias instituições nacionais francesas. Godet começou a desenvolver sua própria abordagem probabilística e baseada softwares para o desenvolvimento de cenários. A principal característica diferenciadora entre os centros de desenvolvimento de cenários dos Estados Unidos e da França é que, enquanto o trabalho inicial de cenários nos Estados Unidos tendia a ser de natureza global, o desenvolvimento de cenários na França concentrava-se nos fundamentos sócio-políticos do futuro da França. Embora a abordagem *La Prospective* para cenários incorpore certas características da metodologia de lógica intuitiva, é uma abordagem mais elaborada, complexa e mais mecanicista do que uma abordagem abertamente intuitiva para o desenvolvimento de cenários, dependendo de modelos matemáticos baseados em computador que têm suas raízes em TIA e CIA (Chermack, 2001).

Atualmente, destacam-se os trabalhos do Professor Thomas J. Chermack, da Colorado State University com o método *Performance-Based Scenario System* (Idem), e do The Frederick S. Pardee Center for International Futures (IFs). O Pardee Center constrói e usa dados e ferramentas para analisar a dinâmica de longo prazo da mudança nos sistemas humanos, sociais e naturais. A principal ferramenta é o modelo International Futures (IFs), que combina modelos interconectados em vários domínios: agricultura, demografia, economia, educação,

energia, meio ambiente, gênero, governança, saúde, infraestrutura, política internacional e tecnologia (Turner *et al.*, 2017).

No Brasil, Marcial e Grumbach (2008) são as principais referências em cenários com método próprio “Método Grumbach” e com participação nos principais cenários feitos para o Brasil nos últimos anos (IPEA/ASSECOR, 2017). Com o modelo além das ferramentas básicas de planejamento estratégico tradicional, agregando metodologia de cenários prospectivos, o que permite uma gestão estratégica de médio e longo prazos e sistematizando as etapas de desdobramento, execução e monitoramento da estratégia em uma abordagem alinhada com a gestão por processos (BPM), gerenciamento de projetos, gestão de riscos e inteligência. No método Grumbach, a gestão estratégica inclui a análise da postura estratégica dos atores face aos cenários alternativos identificados como possíveis. O propósito da análise é identificar parcerias estratégicas que permitam passar de uma postura preativa para uma postura proativa. O método Grumbach possui as seguintes características:

- Seu emprego é facilitado pela utilização de softwares que automatizam os procedimentos previstos em cada uma de suas etapas;
- Adota o enfoque sistêmico em que a instituição objeto de um estudo de planejamento estratégico e cenários prospectivos é tratada como um sistema aberto, que influencia e é influenciada pelo seu ambiente;
- Emprega intensivamente modelagem matemática e ferramentas de pesquisa operacional;
- Emprega princípios da “Teoria dos Jogos” para modelar a forma de agir dos atores (pessoas, empresas e governos);
- Emprega técnicas de análise multicritério para priorização das iniciativas estratégicas;
- Emprega os princípios do BSC para monitorar os objetivos e iniciativas estratégicas;
- Integra o planejamento estratégico aos orçamentos de curto e médio e longo prazos;
- Analisa os riscos estratégicos com metodologias alinhadas com as normas internacionais;
- Emprega técnicas de inteligência estratégica para o monitoramento do ambiente estratégico, possibilitando decisões tempestivas para neutralizar as ameaças e potencializar as oportunidades;
- Priorização das iniciativas estratégicas, com o emprego de técnicas de multicritério.

O método Grumbach vem sendo aplicado no País em consultoria privada para empresas e governos. Outro documento relevante no País foi publicado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) em estudo produzido por Buarque (2003), no qual apresenta uma contribuição para o planejamento de Estado. Segundo o autor,

[...] cada cenário configura e expressa um determinado quadro que há o predomínio de atores em torno de um dado projeto. É esse projeto político que oferece e assegura a sustentação dos cenários, o que é especialmente importante quando se trata de cenários de macrossistemas para o planejamento de Estado. O futuro depende fortemente da capacidade de os atores constituírem um projeto dominante, assumindo a condução do Estado, conferindo a ele capacidade de intervenção e, principalmente, definindo as suas prioridades e as suas formas de atuação nas áreas social, econômica, ambiental, regional, diplomática ou científica e tecnológica (Buarque, 2003 p. 42-43).

Dessa forma, para descrever uma realidade futura (de macrossistemas sociais) é necessário passar por uma análise política que procure interpretar as visões dos atores em relação ao futuro e em relação às políticas e às estratégias governamentais, identificando as alianças prováveis que teriam condições de assumir o controle e a condução das políticas e das iniciativas públicas (Buarque, 2003).

Como o futuro é uma construção social, segundo a definição de Godet (2008), os atores sociais devem ocupar uma posição central na construção de cenários. Assim, um cenário desejável deve ter força e legitimidade política para orientar ações, políticas e estratégias de desenvolvimento apenas quando expressa os desejos dominantes na sociedade.

A partir da década de 1990, a elaboração de cenários foi sendo disseminada pelo mundo e, atualmente, é atividade fim de equipes específicas em grandes empresas, principalmente as do setor de energia. Elaborar cenários prospectivos também é prática sistemática entre as petroleiras, consultorias e organismos internacionais do setor de energia, a exemplo: BP, Shell, Exxon Mobil, DNV, World Energy Council, IRENA, Renewable energy policy network for the 21st century (REN21).

Os métodos para elaboração de cenários apresentam características distintas. A partir da experiência em sistemas específicos como empresas, indústrias, organizações e até para análises globais, os métodos possuem características de apresentarem como resultados estratégias setoriais, orientação para planejamento ou cenários propriamente ditos.

Os procedimentos metodológicos envolvem estudos quantitativos e/ou qualitativos, alguns por meio da utilização de softwares, possuem complexidade em relação à quantidade de etapas e consultas aos especialistas ou dados e sua rigidez quanto às técnicas de pesquisa. O

Quadro 2 apresenta, em síntese, uma comparação entre autores e métodos usualmente utilizados na prospectiva ou estudos de futuro.

**Quadro 2 – Comparativo entre autores e métodos**

	Schwartz	Godet	Porter	Grumbach	International Futures
<b>Aplicação</b>	Organizacional/Setorial	Empresarial	Industrial	Organizacional	Global
<b>Flexibilidade</b>	Flexível	Rígido	Flexível	Rígido	Rígido
<b>Uso de software</b>	Não	MicMAc	Não	Puma/Lice	IFs
<b>Modelos</b>	Qualitativo/hierarquização	Quantitativo	Qualitativo	Quantitativo	Quantitativo
<b>Complexidade</b>	Média	Alta	Média	Altíssima	Altíssima
<b>Resultados</b>	Cenários/Indicadores e sinalizadores	Opção Estratégica e planos	Estratégia Competitiva	Planejamento Estratégico	Cenários quantitativos

Fonte: Elaboração própria de acordo com Schwartz (2006), Godet (1993), Porter (1998), Grumbach (2010), Turner *et al* (2017).

Van der Heijden (2009) postula que as abordagens podem ser obtidas por meio dos métodos indutivos, dedutivos ou incrementais. No método indutivo, a abordagem se desenvolve das partes e vão estruturando os cenários. Os dados e informações são combinados para compor uma sequência integrada. No método dedutivo, os especialistas partem de um quadro geral, analisam dados e desenvolvem narrativas. No método incremental, a aprendizagem ao longo do processo é integrada por meio de incursões no estilo de pensamento da organização.

Dentre os vários métodos existentes para cenários prospectivos, o método da Global Business Network (GBN) descrito por Schwartz, por permitir maior grau de flexibilidade, participação coletiva e pesquisa qualitativa, parece adequar-se melhor aos objetivos desse trabalho.

Na década de 1970, o francês Pierre Wack desenvolveu sua metodologia a partir dos conceitos da *École Française de Prospective*. Com os erros das previsões mais frequentes devido à maior instabilidade mundial, principalmente no mercado de petróleo. Todo o planejamento tradicional baseado em previsões perdia rapidamente suas bases de sustentação. Percebeu-se a necessidade de criar uma nova ferramenta que auxiliasse no planejamento de longo prazo (Marcial e Grumbach, 2008).

Wack buscava perceber os *insights* dos especialistas para ampliar a compreensão do sistema, identificar elementos predeterminados e descobrir as conexões entre as várias forças e eventos que conduziam o sistema em análise. O resultado foi o pioneirismo em trabalhar com cenários, o que conferiu à Royal Dutch Shell destaque em atravessar as crises do petróleo com certo preparo prévio em relação às demais petroleiras.

Em 1988, Peter Schwartz e Pierre Wack criaram a Global Business Network (GBN), empresa com foco em estudos prospectivos, e foram os responsáveis por popularizar a utilização de cenários como instrumento de planejamento estratégico para empresas anglo-

saxônicas (Marcial e Grumbach, 2008). O método da consultoria GBN encontra-se bem detalhado na produção bibliográfica de Peter Schwartz, um dos seus fundadores e ex-assessor da Royal Dutch/Shell Group. A partir das categorias sociedade, tecnologia, economia, política e ambiente, o método em comento utiliza as forças-motrizes, elementos pré-determinados e as incertezas críticas para compor os enredos dos cenários. Com o reconhecimento dos enredos é possível delinear os cenários e validá-los juntos aos participantes da pesquisa (Schwartz, 2006).

Como é reconhecida, a técnica de cenários constitui-se importante ferramenta para a antecipação de futuros, pois lida com as incertezas e com as inter-relações complexas que determinam a trajetória das diversas variáveis e podem subsidiar a tomada de decisão por parte do setor público, privado e organizações que atuam em diversos setores, inclusive para energia.

O processo de elaboração é iniciado com pesquisa e coleta dos dados básicos a partir dos quais os cenários serão construídos, estruturados pelo agrupamento, pela categorização e pela busca de tendências e de sua causalidade subjacente. O passo seguinte é desenvolver uma série de histórias consistentes que projetem a aprendizagem obtida com a pesquisa. O método GBN foi aplicado neste trabalho, com a definição dos elementos no Capítulo 4.

No contexto dos cenários também deve ser considerada a possibilidade de eventos raros e difíceis de prever. Nassim Nicholas Taleb apresentou a *A Lógica do Cisne Negro: O Impacto do Altamente Improvável*, em que a história humana é marcada por acontecimentos inesperados para os quais nem sempre existem conhecidos os recursos de enfrentamento, tanto nos cenários públicos quanto nas esferas mais privadas e pessoais (Taleb, 2015).

Nassim Nicholas Taleb formulou esta teoria com base na experiência que os exploradores do século XVII tiveram ao chegar à Austrália. Até então, presumia-se que todos os cisnes na natureza eram brancos. Porém, ao chegarem ao país da Oceania, descobriram a existência de cisnes negros. O mesmo acontece com adversidades, crises e desastres. Presume-se que podem acontecer, mas não é possível determinar quando.

Frequentemente, o exercício de construir cenários envolve analisar tendências e incertezas a respeito do futuro. Estipulando um horizonte de análise, especialistas podem visualizar aspectos cruciais de mudanças em um determinado sistema em análise. Aqui serão considerados os estudos da Agência Internacional de Energia (IEA), do World Energy Council (WEC) e da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA).



## 2. Os cenários globais em energia

Desde 1998, a IEA publica, anualmente, o seu *The World Energy Outlook* (WEO), fornecendo dados, análises críticas e percepções sobre as tendências de demanda e fornecimento de energia, e o que elas significam para a segurança energética, proteção ambiental e desenvolvimento econômico (IEA, 2021).

O WEO usa uma abordagem baseada em cenários para destacar as principais escolhas das partes interessadas, consequências e contingências para o curto e longo prazo, e para ilustrar como o curso do sistema de energia pode ser afetado pela mudança de algumas das variáveis-chave, principalmente as políticas de energia adotadas por governos em todo o mundo.

O World Energy Council (WEC, 2019) analisou as transformações vitais dos sistemas globais de energia em andamento. O aumento do uso de energia renovável, combinado com a eletrificação intensificada, pode ser decisivo para o mundo atingir as principais metas climáticas até 2050.

A Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) publicou seu *Global energy transformation: A roadmap to 2050* com as opções imediatamente implantáveis e econômicas para os países cumprirem os compromissos climáticos e limitar o aumento das temperaturas globais. A transformação energética prevista também reduziria os custos líquidos e traria benefícios socioeconômicos significativos, como aumento do crescimento econômico, criação de empregos e ganhos gerais de bem-estar.

O relatório expande o roteiro abrangente da IRENA, que examina os caminhos tecnológicos e as implicações políticas para garantir um futuro energético sustentável. Aumentar a eletricidade para mais da metade do mix de energia global (acima de um quinto atualmente) em combinação com energias renováveis reduziria o uso de combustíveis fósseis, responsáveis pela maior parte das emissões de gases de efeito estufa. Os três documentos mencionados são referência para países e empresas por conjugar a visão dos especialistas para nível global.

Mudanças como pandemias, conflitos e guerras, por exemplo, podem ser fatores que impactam diretamente a análise de cenários. Mesmo antes da pandemia da Covid-19, incertezas faziam parte das perspectivas em relação à transição da Era dos combustíveis fósseis para uma Era de matriz energética renovável, limpa e de baixo carbono. Se os preços do petróleo já vinham caindo desde 2015 (IEA, 2018), com a pandemia, a demanda mundial foi reduzida e o

preço do barril WTI<sup>8</sup> registrou em junho de 2020 a menor cotação em 18 anos, chegando a US\$ 26 (NASDAQ, 2021). De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), o consumo mundial retornasse ao nível de 2012, a 90,6 milhões de barris por dia.

A modelagem da DNV GL (Alvik & Irvine, 2020) prevê que os efeitos da pandemia reduzirão a demanda de energia até 2050 em 8%, resultando em demanda de energia em 2050 (456 EJ) quase exatamente no nível em 2018 (424 EJ). Assim, algumas previsões apontam para efeitos duradouros da crise.

Segundo Sachs (2007), o começo do século XXI coincidiria com o início de mais uma revolução energética desencadeada pelo encarecimento do petróleo e condicionada por três fatores: o desnível entre o volume da sua produção e o das reservas recém-descobertas que acarretaria o “pico do petróleo”, alterações do clima por emissões de gases de efeito estufa (GEE) e crises geopolíticas entre os países produtores e importadores.

Entretanto, com as medidas de isolamento necessárias para conter o novo coronavírus (SARS Cov-2), adotadas primeiro na China e Ásia, seguidas pela Europa, Américas e África, a recessão econômica provocou impactos significativos no setor energético, ensejando aceleração de algumas tendências e o aumento de incertezas-críticas para os formuladores de políticas e para o setor privado. De fato, como enfatizado por Sachs, o primeiro semestre de 2008 registrou o recorde histórico do preço do barril em torno de US\$ 150. Desde então, o preço reduziu e flutuou por volta dos US\$ 70/barril.

Antes da pandemia, a IEA concebeu três cenários no World Energy Outlook 2019: Políticas atuais (*Business as usual*), Políticas Declaradas e Desenvolvimento Sustentável (Quadro 3). Embora os cenários considerassem riscos geopolíticos, ataques cibernéticos e aquecimento global, em nenhum deles constavam os riscos de uma pandemia global e seus impactos na economia.

### Quadro 3 – Cenários World Energy Outlook 2019

O cenário de “Políticas Atuais” (*Business as usual*) mostra o mundo sem nenhuma alteração na política energética. Nesse cenário, a demanda de energia aumenta 1,3% a cada ano até 2040, com a crescente demanda por serviços de energia e por esforços para melhorar a eficiência. Este cenário resultaria em aumento das emissões relacionadas à energia e em tensões crescentes em segurança energética.

O “Cenário de Políticas Declaradas” incorpora as intenções e metas de políticas atuais. A demanda de energia aumenta 1% ao ano até 2040. Fontes de baixo carbono, lideradas por energia solar fotovoltaica, representam mais da metade desse crescimento e o gás natural, impulsionado pelo aumento do comércio de gás natural liquefeito (GNL), representa mais um terço. A demanda por petróleo diminui na década de 2030 e o uso de carvão diminui. Algumas partes do setor de energia, lideradas pela eletricidade, sofrem transformações rápidas. Alguns países, principalmente os que têm aspirações de

<sup>8</sup> Petróleo de referência nos Estados Unidos.

“zero emissões líquidas”, vão progredir na reformulação de todos os aspectos de sua oferta e consumo. Mesmo assim, o mundo fica muito aquém das metas de sustentabilidade compartilhadas.

O “Cenário de Desenvolvimento Sustentável” mapeia uma maneira de cumprir completamente as metas de energia sustentável, exigindo mudanças rápidas e generalizadas no sistema energético. Esse cenário traça um caminho totalmente alinhado com o Acordo de Paris, mantendo o aumento das temperaturas globais abaixo de 2° C e envidando esforços para limitá-lo a 1,5° C e atende aos objetivos relacionados ao acesso universal à energia e ar limpo. A amplitude das necessidades mundiais de energia significa que não há soluções simples ou únicas. Cortes acentuados nas emissões são alcançados em todos os aspectos, graças a vários combustíveis e tecnologias que fornecem serviços de energia eficientes e econômicos para todos os países.

Fonte: IEA (2019).

Com a pandemia, o Cenário Desenvolvimento Sustentável parecia plausível considerando que é esperada uma queda de demanda que perduraria por um longo período. Entretanto, alguns advogam que a pandemia trouxe consigo a oportunidade para grandes mudanças e acelerou a Quarta Revolução Industrial devido a intensa digitalização, aumento e adequação do trabalho “home office”, a crise econômica e ao papel das renováveis tanto quanto ao baixo custo, autossuficiência e redução das emissões (IRENA, 2020; WEF, 2020).

Por outro lado, a crise impôs um contingenciamento de investimentos, que aliado ao preço reduzido dos combustíveis fósseis, pode ser uma ameaça a uma transição energética rápida. O resultado foi que, em 2021, os preços do óleo dispararam para o consumidor final na maioria dos países.

Segundo avaliação da IEA (IEA, 2021), a queda histórica no consumo global de energia nos primeiros meses da crise da Covid-19 em 2020 levou os preços de muitos combustíveis aos níveis mais baixos em décadas. Mas, desde então, eles se recuperaram fortemente, principalmente como resultado de uma recuperação econômica global excepcionalmente rápida, um inverno longo e frio no hemisfério norte e um aumento da oferta mais fraco do que o esperado. Assim, a pandemia inseriu ainda mais incertezas aos cenários.

### **3. O impacto da pandemia de Covid-19 no setor de energia**

A pandemia da Covid-19 colocou praticamente todos os países do mundo em uma recessão histórica. O Banco Mundial estimou, para 2021, uma contração em média de 5,2% na economia global, sendo 7% em países desenvolvidos e para os emergentes e em desenvolvimento 2,5%, e uma lenta retomada. Esse contexto impactou diretamente o consumo de energia global com a redução da mobilidade, quedas de demanda e oferta, falências e o fechamento total ou parcial de atividades de bens e serviços. O Banco Mundial também postulou a expectativa de declínio da renda per capita em 3,6% (World Bank, 2020).

O resultado desse cenário é que a demanda de energia contraiu 6%, a maior em 70 anos em termos percentuais e a maior já em termos absolutos. O impacto da Covid-19 na demanda de energia em 2020 seria sete vezes maior que o impacto da crise financeira de 2008 na demanda global de energia. De acordo com a IEA (2020)<sup>9</sup>, os países que passaram por *lockdown* sofreram um declínio médio de 25% na demanda de energia e os países com medidas de distanciamento social parcial um declínio médio de 18%, representando mais de dois terços da demanda global de energia, o que reflete que a queda da demanda foi afetada pela duração e rigor dos bloqueios nas atividades econômicas e sociais.

A demanda global de carvão foi a mais atingida, caindo quase 8% em comparação com o primeiro trimestre de 2019, principalmente porque a China, cuja economia é fortemente baseada em carvão, foi o país mais atingido pela Covid-19 no primeiro trimestre de 2020. A oferta de gás a preços competitivos, o crescimento contínuo de fontes renováveis superou o carvão e o clima ameno na região também limitou o uso de carvão naquele país. A demanda por petróleo também foi fortemente afetada, o que contabilizou uma queda de quase 5% no primeiro trimestre, principalmente devido à redução na mobilidade e na aviação, que representam quase 60% da demanda global de petróleo. No final de março/20, a atividade global de transporte rodoviário estava quase 50% abaixo e a aviação 60% abaixo da média de 2019 (IEA, 2020).

As energias renováveis foram as únicas fontes que registraram crescimento na demanda devido a maior capacidade instalada e prioridade no despacho. A geração baseada em renováveis aumentou 3%, principalmente por causa de um aumento percentual de dois dígitos para energia eólica e salto na produção solar fotovoltaica dos novos projetos em 2019. A participação de fontes renováveis no fornecimento de eletricidade se aproximou de 28% no primeiro trimestre de 2020, ante 26% no primeiro trimestre de 2019 (IEA, 2020).

A geração de energia nuclear caiu 3% em resposta à menor demanda e porque alguns reatores não estavam operando em algumas regiões. A geração de baixo carbono aumentou no total, no entanto, reduzindo a necessidade de eletricidade produzida a partir de combustíveis fósseis em cerca de 3%. A geração a gás aumentou 4%, impulsionada pelos baixos preços do gás natural nos mercados em todo o mundo. Em alguns mercados, pela primeira vez, surgiram oportunidades de troca de carvão para gás devido aos custos do combustível.

Considerando que aproximadamente 80% da matriz energética mundial é não renovável e altamente poluente (IEA, 2016), durante os meses de março a abril, as emissões globais diárias

---

<sup>9</sup> Dados diários coletados para 30 países até 14 de abril/20 (IEA, 2020).

de CO<sub>2</sub> diminuíram –17% no início de abril de 2020 em comparação com os níveis médios de 2019, pouco menos da metade das mudanças no transporte terrestre. No auge do isolamento social, as emissões em países individuais diminuíram em -26%, em média (Le Quéré; Jackson & Jones. *et al.*, 2020).

As análises feitas em 2021 indicam que, depois de aumentar continuamente por décadas, as emissões globais de dióxido de carbono caíram 6,4%, ou 2,3 bilhões de toneladas, em 2020, conforme a pandemia de Covid-19 limitou as atividades econômicas e sociais em todo o mundo. O declínio é significativo - quase o dobro das emissões anuais do Japão - mas menor do que muitos pesquisadores do clima esperavam, dada a escala da pandemia, e a expectativa era que não deve durasse depois que o vírus estivesse sob controle.

No início do ano de 2020, a China experimentou as maiores reduções de emissões, pois bloqueou suas cidades e indústrias para domar a propagação inicial do coronavírus. Mas depois que o país controlou o surto, a economia e a produção industrial se recuperaram rapidamente - o total de 2020 dos impactos das medidas de isolamento durante a pandemia e superou até mesmo os resultados de 2019. Nos Estados Unidos as emissões caíram em quase 650 milhões de toneladas, com uma redução de quase 13% em suas emissões, e foram responsáveis por mais de um quarto de redução global das emissões de CO<sub>2</sub>. A Índia seguiu, com uma redução de quase 200 milhões de toneladas. Globalmente, o setor de energia mais afetado por bloqueios e restrições de pandemia foi a aviação, onde as emissões caíram 48% em relação ao total de 2019 (NATURE, 2021).

Ainda sobre os impactos da crise, pesquisa do *World Energy Council* verificou que uma transformação vital dos sistemas globais de energia está em andamento. Um terço das empresas de energia planeja demitir funcionários. Isso pode significar 350.000 empregos em risco nas economias do G7. O WEC realizou pesquisa com *stakeholders* do setor energético com 220 respondentes em 61 países (WEC, 2020), conforme Quadro 4:

#### **Quadro 4 – World Energy Council - Como a Covid-19 está impulsionando uma realocação histórica do investimento em sistemas de energia**

Resultados da pesquisa WEC (2020):

- Espera-se uma redução estimada de US\$ 200-400 bilhões em bens de capital;
- 4 em 10 empresas de energia relatam cortes nas despesas operacionais em mais de 10%;
- 1 em 3 empresas planejam fechar uma ou mais unidades de negócios;
- Todos os setores de energia relataram uma mudança significativa na alocação de investimentos;
- A principal prioridade para empresas de energia é digitalizar as atividades comerciais, com dois terços declarando a intenção de acelerar os planos de ação digital;

- 42% relataram planos para aumentar os gastos em P&D;
- 48% planejam manter a equipe do escritório trabalhando em casa;
- Mais de 80% estão mudando o foco dos negócios;
- Mais de 40% estão aumentando investimentos e atividades focadas em meio ambiente, social e de governança;
  - A pressão dos investidores institucionais está aumentando sobre como as empresas de energia operam no futuro; e
  - 38% esperam um 'novo normal' para sistemas de energia.

Fonte: WEC (2020).

A pesquisa mostrou ainda que enquanto as percepções sobre o novo normal na Europa, Ásia, América Latina e Caribe estão alinhadas com a visão global (entre 31% e 35%), a maioria dos entrevistados na África e na América do Norte (48% e 61 %) não esperam um retorno aos negócios como de costume e acreditam que as empresas precisam se ajustar a um futuro pós-pandemia diferente.

Quase um quarto (22%) das organizações está acelerando seus programas climáticos, adotando metas climáticas mais rigorosas ou encurtando o horizonte de tempo para as metas climáticas, enquanto outro quarto (25%) adia programas de mudança climática para priorizar a manutenção do fluxo de caixa. Um terço das grandes empresas com mais de 500 milhões de faturamento está redesenhando programas relacionados ao clima (WEC, 2020).

As políticas e os investimentos definirão como ocorrerá a retomada da economia. Nesse sentido, o Fórum Econômico Mundial propôs a iniciativa “The Great Reset” para incentivar uma economia mais justa, sustentável e resiliente, e isso inclui uma infraestrutura de energia mais limpa e renovável, que garanta autossuficiência.

Em paralelo, 2020 foi o ano que marcou a implantação concreta das ações previstas no Acordo de Paris pela redução das emissões de GEE. Entretanto, o IPCC concluiu que as iniciativas voluntárias atuais serão incapazes de conter o aquecimento em 1,5°C, alertando que será necessário um comprometimento sem precedentes de todas as nações e uma mudança rápida nos sistemas de produção e consumo para que esse nível seja mantido. Isso exigirá uma queda de 45% nas emissões totais até 2030 e de 100% até 2055 (IPCC, 2022).

A pandemia causada pelo novo coronavírus foi uma janela de oportunidade para incentivar uma retomada econômica e social de baixo carbono, principalmente devido à constatação de que pandemias, eventos climáticos extremos e mudanças de temperatura não são facilmente controlados pela espécie humana e pela tecnologia.

#### 4. Os cenários prospectivos e as metas climáticas

Devido à pandemia de Covid-19, em fevereiro de 2020, as vendas de carros na China caíram 92% em relação a 2019, antes de se recuperar para 48% abaixo dos níveis de 2019 em março (BLOOMBERG, 2020). Em todo o mundo, as vendas de carros em março caíram 55% em relação aos níveis de 2019. As vendas de veículos elétricos (VE) mantiveram seu nível na União Europeia, no entanto, atingindo recorde nas vendas em muitos países, com os padrões de CO<sub>2</sub> desempenhando um papel importante no aumento das vendas. Entretanto, na China e nos EUA as vendas de VE caíram (IEA, 2020). O aumento das vendas resulta em carros com maior eficiência energética em circulação e, por outro lado, quedas nas vendas pode significar carros mais poluentes em uso. Esse cenário também indica uma economia em estagnação, que gera uma reação em cadeia, principalmente no que se refere aos investimentos.

A Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA) avaliou que a parcela de energias renováveis aumentou vários anos antes das expectativas pré-pandemia reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub> e a poluição do ar. A flexibilidade dos sistemas elétricos foi crucial para que as principais economias mantivessem a segurança energética (IRENA, 2020).

Para a IRENA, a crise da Covid-19 influenciou o caminho para as transições de energia limpa. As emissões globais de CO<sub>2</sub> registram a maior redução registrada ano a ano, mas um caminho de energia sustentável exige esforços e comprometimento contínuos. O declínio sem precedentes nas emissões em 2020 pode ter sido apenas temporário se não forem implementadas mudanças estruturais. Há a preocupação de que o efeito rebote pós-crise resulte no aumento das emissões.

Para Alvik & Irvine (2020) as emissões de CO<sub>2</sub> provavelmente já atingiram o pico em 2019, no entanto, isso pouco significa para avançar no progresso do mundo em direção às ambições climáticas de Paris. De fato, o declínio a longo prazo das emissões não foi significativamente acelerado pela pandemia. Mesmo com o pico de emissões em anos anteriores e a demanda de energia estável até 2050, a transição energética ainda não é rápida o suficiente para alcançar a meta do Acordo de Paris de manter o aquecimento global bem abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais. Para atingir a meta de 1,5°, seria necessário repetir o declínio de 2020 em todos os anos seguintes.

A IRENA advoga que as medidas de recuperação pós-Covid podem levar a uma mudança duradoura no mix global de energia, com inserção massiva de energias renováveis na matriz energética global. Vincular a recuperação de curto prazo a estratégias de médio e longo prazo é fundamental para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e o

Acordo de Paris sobre mudanças climáticas. Além disso, a Agência demonstra que cada milhão de dólares investidos em renováveis ou em flexibilidade energética criaria pelo menos 25 empregos, enquanto cada milhão investido em eficiência criaria cerca de dez empregos. Em comparação com os planos atuais, uma transição energética acelerada pode adicionar 5,5 milhões de empregos a mais até 2023 (IRENA, 2020).

Se a energia renovável continuar crescendo nas mesmas taxas que as observadas em 2015-18, as metas globais cumulativas atualmente em vigor para 2030 poderão ser cumpridas a partir de 2022. O progresso do mercado e os objetivos de recuperação com base em renováveis podem refletir-se em atualização das *Nationally determined contributions* (NDCs) (IRENA, 2020). No entanto, para setores difíceis de descarbonizar como aviação, transporte de longa distância e navegação; produção de materiais estruturais intensivos em carbono, como aço e cimento; os esforços precisam ser concentrados em neutralizar emissões por um período de transição (Davis *et al.*, 2018).

No curto prazo, a IRENA propõe que os países forneçam garantias para estimular o setor privado a mobilizar capital, reduzam o financiamento dos combustíveis fósseis e realoquem para energias renováveis, implementem a precificação do carbono para evitar distorções econômicas à medida que a pandemia recua, e mobilizem investimentos em infraestrutura para energias renováveis (por exemplo, redes inteligentes, estações de recarga de VE).

No longo prazo, a IRENA (2020) propõe estabelecer políticas abrangentes para atrair investimentos relacionados à transição energética, criar *pipelines* de projetos de energia renovável negociáveis, estabelecer requisitos de sustentabilidade para os investidores (por exemplo, análise e divulgação de riscos climáticos), adotar padrões e capacitação para títulos verdes de acordo com os objetivos climáticos globais.

Grandes petroleiras já trabalham com a necessidade de diversificar seu portfólio. A BP (2019) prevê em seu *outlook* anual que, considerando que energia renovável cresce rapidamente, contribuirá com metade do crescimento do suprimento global de energia e se tornará a maior fonte de energia até 2040. Nesse sentido, a BP incrementa seu portfólio a cada ano, principalmente em biocombustíveis e solar.

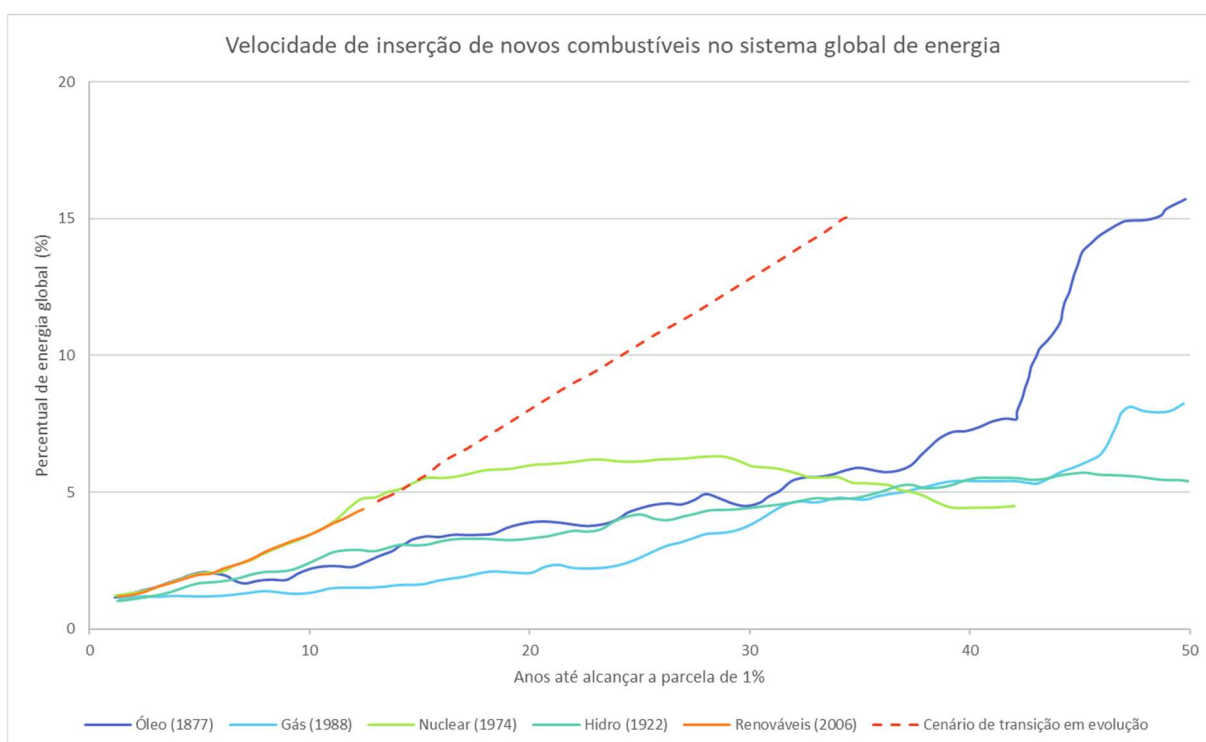
A Shell, no seu cenário “Sob novas lentes” (SHELL, 2013), já estudava o nexo água, energia e alimentos e o papel das renováveis, colocando o declínio dos combustíveis fósseis a partir de 2035. Em seu *Sky Scenario* prevê um mundo que alcança emissões líquidas de carbono zero até 2070, portanto (na contabilidade da empresa) mantendo temperaturas médias globais abaixo da meta internacional de 2°C. Esse cenário tem influenciado o portfólio da empresa por investimentos em renováveis.



Por outro lado, Exxon Mobil e Chevron são mais lentos do que as europeias para se comprometer com metas relacionadas ao clima que são tão abrangentes, dizem analistas<sup>10</sup>, em parte porque enfrentam menos pressão do governo e dos investidores.

O Gráfico 4 demonstra o desempenho ascendente e rápido das renováveis em comparação com as demais fontes energéticas. A expectativa de aumento no mix de energia continua pelos próximos anos.

**Gráfico 4 – Velocidade da penetração das novas energias no sistema global de energia**



Fonte: Elaborado com dados BP (2019).

Para o período pós-pandemia, o WEC elaborou 4 cenários plausíveis em que seus slogans são Pause, Fast-forward, Rewind e Re-record (Quadro 5):

<sup>10</sup> The New York Times. Europe's Big Oil Companies Are Turning Electric. Disponível em: <https://www.nytimes.com/>. Acessado em: 18 de agosto de 2020.

### Quadro 5 – Cenários Pós-Covid-19 - World Energy Council

PAUSE\*: colaboração visando o retorno à normalidade.

Dívidas e incertezas tornam difícil o financiamento de novos projetos, retardando significativamente a transição para uma nova economia de energia. A maioria dos governos responde à iminente crise climática com políticas que enfatizam mais a estabilidade do que a mudança. Embora ninguém esteja disposto a desistir das ambições de Paris, há uma aceitação geral de que o progresso será mais lento do que o esperado.

FAST-FORWARD\*: oportunidades colaborativas de transformação.

A colaboração entre os produtores de petróleo para controlar a oferta permite que os preços do petróleo subam. Contra esses preços, a energia renovável se torna mais competitiva, especialmente quando as infraestruturas renováveis podem ser construídas de forma colaborativa. A colaboração também forma a base do progresso na implementação de políticas de mudança climática - embora esse progresso em direção a uma transição justa, embora mais rápida do que o esperado, ainda seja lento demais para atingir as metas de emissões.

REWIND: um afastamento da globalização para reparar a economia local em alguns setores, principalmente energia, agricultura e fármacos, resulta em crescente movimento protecionista à medida que o comércio se torna menos global e mais bilateral.

Um enfoque interno voltado para dentro cria uma lacuna crescente entre países ricos e pobres, com recuperação desigual em todos os níveis. Esse desacoplamento global se estende à energia também. Como a demanda se recupera em países ricos, um atraso no aumento da capacidade leva a um forte aumento nos preços do petróleo. Os países ricos resistem a isso e alguns até continuam desenvolvendo suas capacidades de energia renovável. Mas países pobres são deixados com recursos próprios, o que força que muitos continuem com sua matriz poluidora.

RE-RECORD: experimentos de baixo para cima para criar uma transição centrada no homem.

Sob o estímulo triplo dos trabalhadores de baixos salários, ativistas ambientais locais e o movimento de responsabilidade social corporativa cada vez mais influente, os governos oferecem incentivos para transformações na infraestrutura energética. O investimento financeiro começa a migrar de combustíveis fósseis para misturas de combustíveis fósseis e renováveis em diversos caminhos para economias circulares e sistema de energia híbrida. Essas experiências locais, possibilitadas pela tecnologia, começam a regravar a versão antiga da infraestrutura global de energia, com a criação de novas fontes renováveis, armazenamento local e opções de regeneração com foco local.

\* Para cada um dos dois cenários de 'baixa confiança', o WEC assume que o PIB global diminui 8% em 2020, com um aumento anual a taxas históricas para 2024. Com essa recuperação, a energia eólica e solar aumentariam sua participação na geração para quase 9% em 2020.

Fonte: WEC (2020).

Utilizados em conjunto, esses cenários podem levar a uma governança de melhor qualidade sobre a realocação de investimentos, estratégias e definição de políticas necessárias para permitir uma transição energética global organizada à medida que o mundo supera a crise. Entretanto, ao contrário das outras transições energéticas fortemente correlacionadas às duas primeiras revoluções industriais, essa transição energética, calcada no desafio de alcançar uma transição de baixo carbono, exige mudanças sociais em uma escala comparável à das revoluções industriais anteriores.

No entanto, a transição de baixo carbono ainda não representa outra revolução industrial, em termos de suas tecnologias e práticas, seus conjuntos desejáveis de características e sua capacidade de estimular a produtividade duradoura e os ganhos de produção do tipo experimentado anteriormente. Pode, no entanto, gerar ganhos notáveis e sem precedentes de bem-estar, se conseguir evitar os impactos humanos, ambientais e econômicos extremos das mudanças climáticas. Isso equivaleria a um tipo diferente de revolução industrial (Pearson & Foxon, 2012).

Além disso, existem certas restrições técnicas a essas fontes alternativas, tais como o aumento da eficiência nas aplicações do usuário final mostra limitações termodinâmicas, o uso direto de energias renováveis tem disponibilidade limitada e CCS (captura e armazenamento de carbono) ou CCU (captura de carbono e uso) tem disponibilidade limitada de armazenamento e uso de CO<sub>2</sub>. Outras limitações para o uso direto de eletricidade em alguns setores incluem restrições técnicas, considerações de custo e questões de infraestrutura, incluindo o tempo e aceitação para construir a infraestrutura necessária. No entanto, aumentar o uso direto de eletricidade formará um pilar central da transição energética (WEC, 2018).

Assim, ao avaliar cenários futuros, há que se considerar que as forças que impulsionam a transição energética do século XXI não possuem todos os elementos das transições anteriores. Enquanto as transições anteriores estavam relacionadas às mudanças tecnológicas atreladas às revoluções industriais, as conexões entre o modo produtivo ainda enfrentam *trade-off* em relação ao custo e a tradição dos combustíveis fósseis.

Outro cenário importante para o setor energético foi apresentado pela IRENA em seu *Roadmap 2050* (IRENA, 2020). O documento destaca rotas importantes para orientar empresas e países para alcançarem a transformação do sistema energético global acelerando substancialmente para atender aos objetivos do Acordo de Paris. Esses objetivos são manter o aumento das temperaturas globais médias “bem abaixo” de dois graus Celsius (2°C) e,

idealmente, limitar o aquecimento a 1,5°C no século XXI, em comparação com os níveis pré-industriais.

A partir de dois cenários, sendo o primeiro denominado Caso de Referência, que considera as políticas atuais e planejadas dos países e inclui compromissos assumidos em Contribuições Nacionalmente Determinadas e outras metas previstas. Apresenta uma perspectiva baseada nas projeções e planos energéticos atuais dos governos. O segundo cenário, denominado REmap, inclui a implantação de tecnologias de baixo carbono, baseadas em grande parte em energia renovável e eficiência energética, para gerar uma transformação do sistema energético global que limite o aumento da temperatura global bem abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais. O cenário está focado nas emissões de dióxido de carbono relacionadas à energia, que representam cerca de dois terços das emissões globais de gases de efeito estufa.

Segundo o documento, a eletrificação com energia renovável pode começar a reduzir imediata e substancialmente as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia. A eletrificação também está ficando mais acessível do que as alternativas baseadas em combustíveis fósseis, reduz a poluição do ar local e aumenta os benefícios para a saúde, resulta em benefícios socioeconômicos positivos e será um facilitador essencial para construir uma economia e sociedade conectadas e digitalizadas. A eletrificação, quando combinada com energias renováveis, oferece também eficiência energética, resultando em menor demanda geral de energia.

Até 2050, a eletricidade poderá tornar-se o principal transportador de energia, passando de uma quota de 20% do consumo final para quase 50% – e, como resultado, o consumo bruto de eletricidade mais do que duplicará. A energia renovável será capaz de fornecer a maior parte da demanda global de energia (86%). Os principais impulsionadores desse aumento na demanda de eletricidade seriam mais de 1 bilhão de veículos elétricos, o aumento do uso de eletricidade para aquecimento e o surgimento do hidrogênio renovável. No geral, a energia renovável forneceria dois terços da energia final (IRENA, 2020).

Para cada US\$ 1 gasto na transição energética, haveria um *payoff* entre US\$ 3 e US\$ 7 – ou, em termos cumulativos até 2050, um *payoff* entre US\$ 65 trilhões e US\$ 160 trilhões. A transição energética requer menos subsídios gerais, já que os subsídios totais do setor de energia podem ser reduzidos em US\$ 10 trilhões durante o período. No entanto, o foco dos subsídios precisará mudar progressivamente – longe da energia e dos combustíveis fósseis e para tecnologias e soluções de eficiência energética necessárias para descarbonizar a indústria e os setores de transporte.

O nível de investimentos adicionais necessários para colocar o mundo em rota de mitigação da crise climática acima dos planos e políticas atuais é de US\$ 15 trilhões até 2050. No geral, o investimento total no sistema energético precisaria atingir US\$ 110 trilhões até 2050, ou cerca de 2% da média anual do produto interno bruto (PIB) no período.

As emissões anuais de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia no cenário REmap diminuem 70% abaixo do nível atual. Estima-se que 75% dessa redução pode ser alcançada por meio de energia renovável e tecnologias de eletrificação; se incluir a eficiência energética, esta quota sobe para mais de 90%.

No entanto, o mundo está em um caminho muito diferente. De acordo com a IRENA (2020), as emissões relacionadas à energia aumentaram mais de 1% ao ano, em média, entre 2015 e 2020. Os planos e políticas atuais, incluindo Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), resultam em um nível similar de emissões em 2050 em relação a 2020, o que arrisca colocar o mundo em um caminho de 2,6 graus Celsius de aumento de temperatura ou mais já após 2050. O relatório mostra que as emissões precisariam ser reduzidas em cerca de 3,5% ao ano de agora até 2050, com reduções contínuas após esse período. As emissões relacionadas à energia precisariam atingir o pico em 2020 e diminuir a partir de então.

Qualquer roteiro de transição energética interagirá com a evolução do sistema socioeconômico no qual está implantado, produzindo uma série de resultados que podem ser entendidos como pegada socioeconômica. O grau em que essa pegada inclui benefícios ou resultados menos favoráveis depende das sinergias entre a transformação energética e a evolução do sistema socioeconômico. O equilíbrio entre benefícios e resultados menos favoráveis varia de acordo com a região devido à sua ambição de transformação divergente e às diferentes dinâmicas socioeconômicas.

O Estudo também mostrou que dentro do próprio setor de energia, a perda de empregos relacionados aos combustíveis fósseis é mais do que compensada pelo aumento do emprego relacionado à transição (renováveis, eficiência energética e flexibilidade energética). A melhoria relativa geral em relação ao Caso de Referência nas três dimensões do indicador de bem-estar (econômica, social e ambiental) é de 17%, fortemente impulsionada pelas melhorias na saúde e no meio ambiente.

Os danos climáticos reduzem significativamente o desempenho macroeconômico dos cenários de Referência e REmap, com o impacto aumentando ao longo do tempo à medida que as mudanças climáticas se desenrolam, tornando o aumento da ambição de transição um objetivo prioritário. Devido à mitigação de emissões do REmap transformação e danos climáticos na economia em geral são menores do que no Caso de Referência e, portanto, o

desempenho relativo sobre o Caso de Referência melhora. Em termos de PIB, até 2050, a melhora relativa em relação ao Caso de Referência aumenta de 2,5% para 5,3% quando os danos climáticos são considerados na análise macroeconômica.

A tecnologia está progredindo rapidamente, e hoje existem soluções que podem ser implantadas em larga escala e são cada vez mais competitivas em termos de custos. Para a IRENA (2020), os governos estão atrasados e deveriam implementar políticas e metas mais agressivas para clima, energia renovável e eficiência energética. A Agência sugere que eles devem alinhar as metas de clima e sustentabilidade com os planos de energia, e devem valorizar esses planos além de apenas o efeito no setor de energia e ter uma visão socioeconômica mais holística. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e as revisões das NDCs oferecem uma oportunidade para os governos trabalharem regional e internacionalmente para conduzir ações coordenadas.

A inovação sistêmica é crucial como um facilitador chave para a transição energética. A IRENA (2020) advoga que os países precisam dedicar mais atenção para permitir sistemas de energia mais inteligentes por meio da digitalização, por meio do acoplamento de setores via maior eletrificação e adotando tendências de descentralização. Essa inovação também precisa ser expandida para além da tecnologia e para mercados e regulamentações, bem como novas práticas operacionais no setor de energia e modelos de negócios.

## **5. Tendências**

As tendências para o setor energético referem-se àqueles eventos cuja perspectiva de direção é suficientemente consolidada e visível para se admitir sua permanência no período considerado. São movimentos bastante prováveis de um ator ou variável dentro do horizonte de estudo (Godet, 1993).

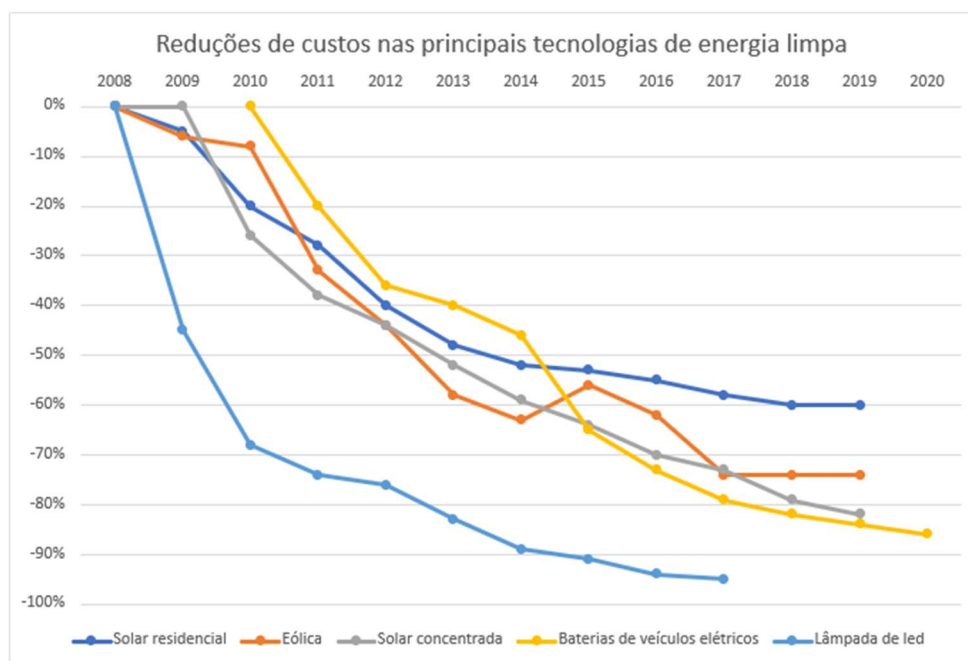
Nesse sentido, serão enumeradas as tendências citadas na bibliografia de referência que já eram presentes pré-pandemia. Algumas aumentaram sua probabilidade de acontecer, outras perderam força devido à pandemia.

### **a. Redução dos custos das tecnologias sustentáveis**

Desde 2008, os custos das tecnologias para energia renovável vêm caindo. As lâmpadas de LED apresentaram as reduções mais significativas (-94%) enquanto a fotovoltaica residencial, em função da escala, apresentou uma redução de -59% (Gráfico 5). No geral, baterias, solar e eólica apresentaram reduções significativas em seus custos em 2018. A

tendência ainda é de queda para a próxima década. Entretanto, a cadeia de suprimentos sofreu impactos com a pandemia, bem como a de logística e os investimentos. É possível que as reduções nos custos sejam menos intensas.

**Gráfico 5 – Redução dos custos nas tecnologias de energia limpa**



Fonte: Elaborado com dados NRDC (2019).

### **b. Dominância dos custos fixos**

Os futuros sistemas energéticos serão dominados pelos custos de investimento. As renováveis ainda possuem uma elevada percentagem de investimento, mas os custos operacionais são muito baixos. Isso permitiu que os leilões de energia solar atingissem o recorde mundial desde 2019. Como exemplo, em Portugal, o leilão de energia realizado em 2019 teve como proposta vencedora o valor de 14,8 euros por MWh, quase menos 70% do que o preço-base. No período pós-pandemia, é possível que os números ainda revelem o crescimento dos investimentos de 2019 e os preços mais competitivos continuem para garantir sua fatia no mercado.

### **c. Descentralização**

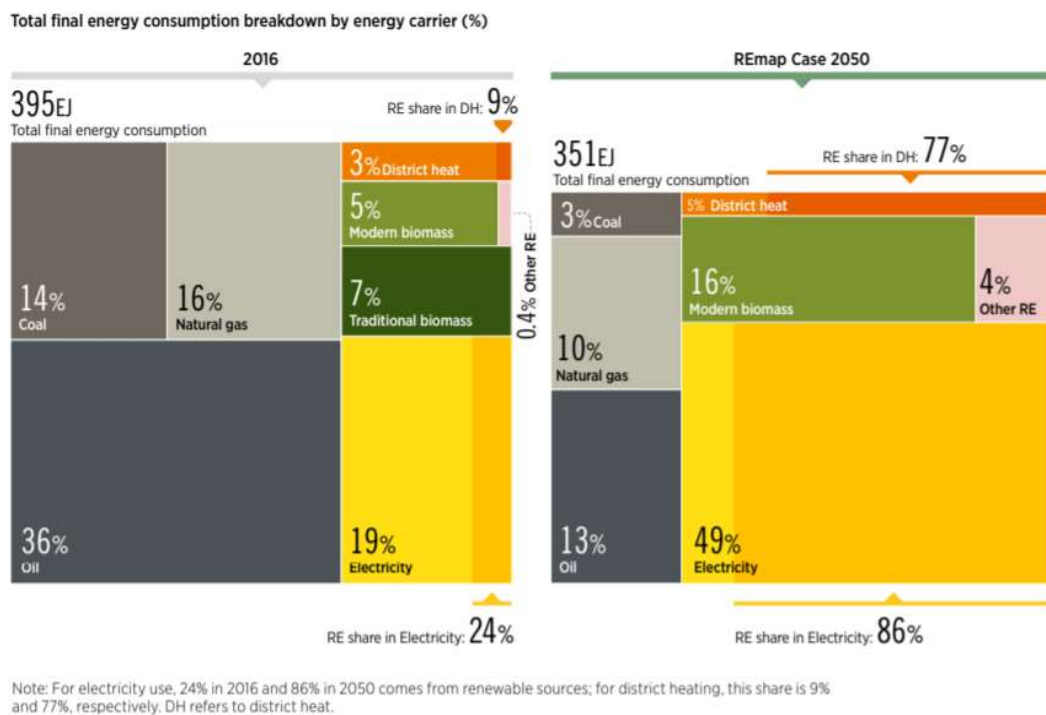
A natureza distribuída das energias renováveis cria a figura dos prossumidores, aqueles que geram a sua própria energia e ainda conseguem alocar sobras para o mercado de energia. Entretanto, o desafio é ampliar o acesso e a sinergia com atividades produtivas, podendo ser um vetor de desenvolvimento regional. A descentralização é um processo que

provavelmente continuará à medida que maiores avanços em tecnologias de armazenamento, veículos elétricos e novas formas de demanda flexível se conectarem à rede. A pandemia reforçou a importância de resiliência, autossuficiência, baixo custo e eficiência oferecidos pelas energias renováveis.

#### d. Eletrificação

A energia elétrica substitui combustíveis fósseis nas indústrias, nos transportes e no setor de energia. A tendência é que a eletricidade aumente sua participação no consumo final global de energia de 19% para 49% em 2050. Redução para petróleo dos atuais 36% para 13% e carvão ficando com apenas 3% (Figura 3). A pandemia enfatizou a importância da digitalização e apontou para a rápida implementação da indústria 4.0.

**Figura 3 – Repartição total do consumo de energia por transportadora de energia**



Fonte: IRENA (2020).

#### e. Eletrificação como vetor da eficiência energética

Eletricidade confere maior eficiência aos sistemas elétricos. A consultoria DNV GL havia previsto que o aumento da eficiência energética resultante da generalização da eletrificação, principalmente no setor de transporte, resultaria em uma redução da demanda energética em 2033 (DNV GL, 2019). Além disso, a proximidade entre geração e consumo proporcionada pelas renováveis reduz as perdas ocasionadas pela transmissão da energia. A



eficiência energética será crucial no período pós-pandemia em que se buscará reduzir perdas e otimizar processos de geração e distribuição.

#### **f. Os combustíveis de transição**

O gás natural, hidrogênio, biocombustíveis e combustíveis sintéticos são a ponte intersetorial da transformação energética. O gás natural permite uma menor emissão de GEE, o hidrogênio verde tem recebido cada vez mais investimentos e os biocombustíveis e combustíveis sintéticos podem ser a chave para reduzir as emissões. Embora os biocombustíveis tenham atingido o recorde de 162 bilhões de litros em 2019, ou 2,8 milhões de barris por dia, espera-se que a produção se contraia em 20 bilhões de litros (13%) em 2020, retornando aos níveis de 2017. Em comparação, antes do início da crise da Covid-19, a produção deveria aumentar em mais cinco bilhões de litros (3% no ano) em 2020 (Biofuture Platform, 2020).

Oportunidades adicionais estão no biogás e biometano, gases que podem desempenhar um papel fundamental na transformação do sistema global de energia, garantindo que os recursos sejam continuamente usados e reutilizados para atender à crescente demanda por serviços de energia, ao mesmo tempo que oferece benefícios ambientais mais amplos. Perceber os múltiplos benefícios do biogás e biometano requer a formulação de políticas coordenadas em energia, transporte, agricultura, meio ambiente e gestão de resíduos. A vantagem dos combustíveis sintéticos é que pode ser utilizada a mesma infraestrutura já disponível para combustíveis fósseis.

### **5. Incertezas**

Segundo a definição de Godet (1993), as incertezas constituem-se em sinal ínfimo por sua dimensão presente, mas imenso por suas consequências e potencialidades no futuro. Assim, as incertezas para o setor energético agregam indefinições que são relevantes para o planejamento estratégico e desempenho do setor.

A crise causada pela pandemia da Covid-19 inseriu ainda mais incertezas nos cenários energéticos. Algumas serão cruciais para definir o impacto na transição energética. São consideradas incertezas pelo WEF (2020):

### Quadro 6 – Incertezas globais para a Transição energética segundo o Fórum Econômico Mundial (2020)

1. A queda do preço dos combustíveis fósseis aumentará a demanda?
2. As petroleiras mudarão seu portfólio de negócios?
3. Haverá sustentabilidade da cadeia de suprimentos das renováveis?
4. Haverá redução das emissões de GEE?
5. Os governos implementarão políticas e incentivos favoráveis às renováveis?
6. Haverá investimento em renováveis suficiente para substituir as fontes poluentes?
7. Os subsídios aos combustíveis fósseis serão reduzidos?
8. É possível uma transição completa na cadeia de matérias-primas (amônia, fertilizantes, coque metalúrgico, asfalto, lubrificantes, plásticos, etc)?
9. Quais são os impactos não lineares da transição?
10. Quanto tempo dura a transição com gás natural?
11. As economias emergentes obterão financiamento de menor custo?
12. Os países implantarão como obrigatórias as tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono?
13. Quais são as melhores ferramentas de política para efetuar mudanças e quais serão adotados mais amplamente?
14. Países adotarão a precificação do carbono?
15. Quanto tempo até a disseminação das redes elétricas inteligentes (Smart Grids) nas principais grandes cidades do mundo?
16. A transição será gradual ou rápida?

Fonte: (WEF, 2020).

Cada país encontra-se em um estágio diferente para a transição. As políticas serão desenhadas por cada país, mas alguns aspectos são fundamentais, tais como: reduzir subsídios aos combustíveis fósseis e taxar suas externalidades negativas, investir e incentivar novas tecnologias renováveis, treinar mão-de-obra, estruturar a cadeia de suprimentos e informar a sociedade sobre a importância e papel da transição.

Atribuir preço ao carbono emitido e não-emitido envolve instrumentos de mercado que ajudam países e empresas a cumprirem metas de corte nas emissões de GEE. Os governos atribuem um custo às emissões por meio da regulamentação de instrumentos como o mercado de carbono e/ou a tributação das emissões. Assim, empresas são estimuladas a investir na economia limpa e de baixo carbono.

Utilizando-se da tecnologia da informação para fazer com que os sistemas elétricos sejam mais eficientes (econômica e energeticamente), confiáveis e sustentáveis, os smart grids contam com sistemas de transmissão e distribuição transparentes e controláveis, fontes de energia renovável, geração distribuída e armazenamento de energia nos dois lados do medidor e capacidade para resposta à demanda e controle de demanda.

Alguns aspectos são cruciais para a velocidade da transição em alguns países. O primeiro deles envolve a maturidade das tecnologias e a demanda por elas. O segundo, o custo de investimento e manutenção. O terceiro, o ambiente político que estimula o mercado e os *policymakers*. Os países em desenvolvimento adotarão as tecnologias renováveis nos seus critérios de crescimento econômico?

As incertezas são o mote dos cenários futuros. Países e empresas traçarão seus planejamentos estratégicos de acordo com o futuro que desejam. Por isso, políticas, inovação e maturidade tecnológica nas empresas e escolhas do consumidor são cruciais para a transição energética.

Este trabalho busca compreender como ocorrerá a transição energética no Brasil, e como os cenários de longo prazo podem orientar a tomada de decisão no País. Para o Brasil, a questão principal é: qual caminho seguir? Para tanto, foi necessário escolher um método de construção de cenários para proceder a análise do fenômeno de transição que ocorre globalmente e quais aspectos estão influenciando o Brasil. Como aproveitar as forças do País e oportunidades da transição, identificar fraquezas e enfrentar ameaças para obter ganhos com esse período de mudanças?

Assim, a técnica de cenários constitui-se importante ferramenta para a antecipação de futuros, pois lida com as incertezas e com as inter-relações complexas que determinam a trajetória das diversas variáveis e podem subsidiar a tomada de decisão por parte do setor público, privado e organizações que atuam no setor de energia.

Frequentemente, o exercício de construir cenários envolve analisar tendências e incertezas a respeito do futuro. Estipulando um horizonte de análise, especialistas podem visualizar aspectos cruciais de mudanças em um determinado sistema em análise.

Para este trabalho, o método descrito por Schwartz (2006) resultou adequado considerando:

- a. a aplicação para o setor de energia;
- b. a flexibilidade em escolher variáveis;
- c. não requerer uso de software específico;
- d. utilizar modelos qualitativos de análise;
- e. possuir baixa complexidade em relação às variáveis e etapas a seguir; e
- f. permitir a elaboração de cenários prospectivos amplos para a transição energética.

De Bruyne, Herman e Schoutheete (1975) apresentaram um importante modelo de compreensão das metodologias qualitativas de pesquisa. Estes autores consideram quatro polos

que orientam a pesquisa qualitativa. O primeiro é o epistemológico definido como o motor da pesquisa. Neste polo é dado o tratamento à concepção e construção do objeto científico a partir da constituição discursiva do objeto em análise.

Essa linguagem remete à noção de paradigma. Kuhn (1983, p. 238) reconhece que paradigma pode ser utilizado para designar todo conjunto de crenças, valores e técnicas comuns aos membros de um dado grupo e, por outro lado, designa soluções concretas de enigmas que podem substituir as regras explícitas enquanto base de soluções para os enigmas que subsistem na ciência.

O segundo polo, denominado teórico, corresponde à instância metodológica em que as hipóteses se organizam e em que os conceitos se definem. São propostas regras de interpretação dos fatos, de especificação e de definição das soluções provisoriamente dadas às problemáticas. Neste polo há a formulação de hipóteses e teorias e sua verificação ou refutação. O polo teórico envolve a análise por meio da interpretação dos dados face às hipóteses formuladas.

O polo chamado morfológico relaciona-se com a estruturação do objeto científico a partir da exposição do objeto de conhecimento, seguida da causalidade, em que há uma posição de coerência lógica e/ou significativa que articula os fatos científicos numa configuração operativa. Este polo permite uma objetivação dos resultados da pesquisa. Há a organização e apresentação dos resultados.

O último polo, chamado técnico, estabelece a relação entre a construção do objeto científico e o mundo dos acontecimentos. Nesta dimensão são recolhidas as informações sobre o mundo real e essas informações são convertidas em dados pertinentes à pesquisa. De Bruyne, Herman e Schoutheete (1975) propõem uma categorização das técnicas em entrevistas ou questionários, observação direta ou participantes e análises documentais.

## **Conclusão**

O método de construção de cenários é um importante processo para que tomadores de decisão e partes interessadas realizem um exercício de reflexão sobre o setor energético. O objetivo desse processo consiste em seguir o melhor caminho para governos ou organizações em qualquer cenário futuro.

A análise da transição energética global indica que o setor é o grande foco das políticas por redução das emissões de GEE. Esse movimento em escala global pode impactar o Brasil

sob vários aspectos no que se refere a mudanças tecnológicas e demanda por processos produtivos com energias renováveis.

A pandemia de Covid-19 e o conflito Ucrânia x Rússia ampliaram as incertezas sobre a velocidade da transição energética global, ao passo que a Agência Internacional de Energia apoia países na construção de rotas para emissões líquidas zero em 2050. Compreender a configuração da matriz energética brasileira é o próximo passo para identificar variáveis importantes para compreender os cenários futuros para o País.

## Referências

- ALVIK, Sverre & IRVINE, Mark. **The impact of COVID-19 on the energy transition**. DNV-GL, 2020. Disponível em: [https://www.dnvgl.com/energy-transition/impact-of-covid19-on-the-energy-transition.html?utm\\_campaign=GR\\_GLOB\\_20Q3\\_PROM\\_ETO\\_2020\\_Covid-19\\_Impact&utm\\_medium=email&utm\\_source=Eloqua](https://www.dnvgl.com/energy-transition/impact-of-covid19-on-the-energy-transition.html?utm_campaign=GR_GLOB_20Q3_PROM_ETO_2020_Covid-19_Impact&utm_medium=email&utm_source=Eloqua). Acessado em: 12 de julho de 2020.
- BARBOSA, Wilson Pereira Filho & AZEVEDO, Abílio Cesar Soares. **Impactos ambientais em usinas eólicas**. Itajubá: AGRENER GD, 2013. Disponível em [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/33318903/8.\\_Impactos\\_Ambientais\\_em\\_Usinas\\_Eolicas.pdf?](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/33318903/8._Impactos_Ambientais_em_Usinas_Eolicas.pdf?). Acessado em 20 de julho de 2020.
- BIOFUTURE PLATFORM. **Biofuture Platform Launch Statement**, 2016. Disponível em: <http://www.biofutureplatform.org/>. Acessado em: 12 de agosto de 2020.
- BLOOMBERG, **China Car Sales Slump 92% in First Half of February on Virus**, 21/2/2020. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-02-21/china-car-sales-tumble-92-in-first-half-of-february-on-virus>. Acesso em 14 de julho de 2020.
- BRADFIELD, R., WRIGHT, G., BURT, G., CAIRNS, G., & VAN DER HEIJDEN, K. The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning. *Futures*, 37(8), 2005, pp. 795-812. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2005.01.003>.
- BUARQUE, Sérgio C. Metodologia e técnicas de construção de cenários globais e regionais. **Texto para Discussão no 939 IPEA**. Brasília, ISSN 1415-4765, 2003.
- CHERMACK. T.J. **A review of scenario planning literature**. *Futures research quartel* 17 (2), 7-32, 2001.
- \_\_\_\_\_. **Scenario Planning in Organizations: How to Create, Use, and Assess Scenarios**. Published by Berrett-Koehler Publishers, 2011.
- DAVIS, Steven J. et al. **Net-zero emissions energy systems**. *Science* 360, eaas 9793(2018). Disponível em: [10.1126/science.aas9793](https://doi.org/10.1126/science.aas9793). Acessado em julho de 2023.
- DE BRUYNE, P., HERMAN, J. e DESCOUTEETE, M. **Dynamic de la recherche em sciences sociales**, Vendôme, P.U.F, 1975.
- DNV GL. **Energy Transition Outlook 2019**. Disponível em: <https://eto.dnvgl.com/2019/>. Acesso em 10 de janeiro de 2020.
- ESTADÃO. **Vendas de automóveis na China caem bruscamente em fevereiro**, 12/03/2020. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/estadao-conteudo/2020/03/12/vendas-de-automoveis-na-china-caem-bruscamente-em-fevereiro.htm?cmpid=copiaecola>. Acesso em 12 de julho de 2020.
- EXAME. **Plano é investir US\$ 3 bi em energias renováveis no mundo, diz Shell**. 19/09/2019. Disponível em: <https://exame.com/negocios/plano-e-investir-us-3-bi-em-energias-renovaveis-no-mundo-diz-shell/>. Acesso em: 16 de julho de 2020.

GODET, Michel. **Manual de prospectiva estratégica: da antecipação à ação**. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1993.

GRUMBACH, Raul José dos Santos. **O Guia do Método Grumbach**. Rio de Janeiro: Brainstorming. 2010.

HEINZEN, Daiane A.M e MARINHO, Sidnei V. **A construção de cenários para o alinhamento entre formulação e implementação da estratégia**. Revista de Ciências da Administração • v. 20, n. 50, p. 24-43, Abril. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-8077.2018 V20n50p24>. Acessado em jul de 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, **World Energy Outlook-2016**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>. Acessado em: 9 de julho de 2020.

\_\_\_\_\_. **About the WEO**. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/world-energy-outlook>. Acessado em 9 de julho de 2020.

\_\_\_\_\_. **Global Energy Review 2020 Abstract The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions**, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/oil#abstract>. Acesso em 9 de julho de 2020.

IPEA, ASSECOR. **Brasil 2035: cenários para o desenvolvimento** – Brasília : Ipea : Assecor, 2017. 320 p. : il., gráfs. color.

IRENA, **Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050** (2019 edition), Abu Dhabi, 2020.

\_\_\_\_\_. **Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050**, Abu Dhabi, 2020.

\_\_\_\_\_. **The post-COVID recovery: An agenda for resilience, development and equality**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.

KUHN, Thomas S. **La Structure des révolutions scientifiques**, St-Amand, Flammarion, Coleção Champs, 1983.

LE QUÉRÉ, C., JACKSON, R.B., JONES, M.W. et al. **Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID-19 forced confinement**. Nat. Clim. Chang. 10, 647–653 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>.

MARCIAL, Elaine Coutinho e GRUMBACH, Raul José dos Santos. **Cenários Prospectivos: como construir um futuro melhor**. 5. Ed ver. Ampl. – Rio de Janeiro: Editora FGV, 2008.

NATURE. **COVID curbed carbon emissions in 2020 — but not by much** (Jan 2021). Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-021-00090-3>. Acesso em: setembro 2021.

NRDC. **Revolution now the future is here for clean energy technology**, 2018. Disponível em: <https://www.nrdc.org/>. Acesso em 12 de julho de 2020.

PEARSON, Peter J.G. & FOXON, Timothy J. **A low carbon industrial revolution? Insights and challenges from past technological and economic transformations.** Energy Policy 50 (2012) p. 117–127.

PETROBRAS. **Cenários Petrobras - 2040 —Visões de futuro para um mundo em transformação.** 2018.

PORTER, Michael E. (orgs) **Estratégia: a busca da vantagem competitiva.** Rio de Janeiro: Campus, 1998.

SACHS, Ignacy. **A revolução energética do século XXI.** Estudos Avançados. 21 (59): 21–38. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142007000100004>.

SHELL. **Cenários sob novas lentes - mudança de perspectiva para um mundo em transição,** 2013. Disponível em: <https://www.shell.com.br/energia-e-inovacao/futuro-da-energia/shell-cenarios/>. Acessado em: 16 de julho de 2020.

SHELL. **Sky Scenario.** Disponível em: <https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/shell-scenario-sky.html>. Acessado em 18 de agosto de 2020.

SCHWARTZ, P. **Scenario Planning: Managing for the future.** England: Wet Sussex, 1998.

\_\_\_\_\_. **A arte da visão a longo prazo. Planejando um futuro em um mundo de incertezas.** 4ª ed. – Rio de Janeiro: Best Seller, 2006.

SUN TZU, **A Arte da Guerra,** Editora Record, Rio de Janeiro, 2001.

TALEB, Nassim Nicholas. **A Lógica do Cisne Negro: O Impacto do Altamente Improvável.** Editora Best Seller, 2015.

THE GLOBAL CARBON ATLAS. **CO2 Emissions.** Disponível em: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>. Acessado em: 13 de julho de 2020.

UGHES, Barry. **Forecasting Globalization: The Use of International Futures (IFs).** In George Modelski, Tessaleno Devezas, and William R. Thompson, eds., Globalization as Evolutionary Process: Modeling Global Change. Routledge: London and New York, 355–380, 2008.

VAN DER HEIJDEN, K. **Scenarios – the art of strategic conversation.** Chichester, Nova York, Brisbane, Toronto, Singapura: John Wiley & Sons, 1996.

WACK, Pierre. **Scenarios: uncharted waters ahead.** Harvard Business Review, p. 72-89, Sept./Oct. 1985.

WORLD BANK. **Global Economic Prospects,** June 2020. Washington, DC: World Bank, 2020. DOI: 10.1596/978-1-4648-1553-9.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The A-Z of the Energy Transition: Knowns and Unknowns. 2020.** Disponível em: [www.weforum.org](http://www.weforum.org). Acessado em: maio/2020.



WORLD ENERGY COUNCIL. **COVID-19 Global Survey Results**, 2nd round, June 2020. Disponível em: [www.worldenergy.org](http://www.worldenergy.org). Acessado em 19 de julho de 2020.

TURNER, Sara *et al.* **Guide to scenario analysis in international futures (ifs)**, Frederick s. Pardee Center, University of Denver, September 2017. Disponível em: [https://korbel.du.edu/sites/default/files/2021-11/IFs%20Documentation%20Guide%20to%20Scenario%20Analysis%20v15.1\\_0.pdf](https://korbel.du.edu/sites/default/files/2021-11/IFs%20Documentation%20Guide%20to%20Scenario%20Analysis%20v15.1_0.pdf). Acessado em jul/2021.

### Capítulo 3 – A matriz energética e as perspectivas para a transição no Brasil.

“O Brasil administra a abundância de fontes energéticas”

BRASIL, Ministério de Minas e Energia (2020).

#### Resumo

As políticas públicas adotadas pelo governo brasileiro ao longo dos anos, associadas às condições naturais do País, possibilitaram ao Brasil uma grande participação de fontes energéticas renováveis (48,3% em 2020), que apresentam baixa emissão de gases de efeito estufa e garantem segurança energética. Destacam-se a fonte hídrica, os biocombustíveis, assim como o crescimento da participação de fontes renováveis de alta variabilidade, como a eólica e a solar, nos últimos anos. Ao mesmo tempo, o País figura como um dos maiores produtores de petróleo do mundo, o que indica a possibilidade de longo período de participação na matriz energética nacional e como *commodity* de exportação. A pesquisa mostrou que, no contexto da transição energética, com incremento de energias renováveis na matriz brasileira, eletrificação e novas tecnologias, o desafio é diversificar o aproveitamento dos recursos renováveis do País, mantendo a alta renovabilidade da matriz nacional, visto que é uma das opções mais promissoras para um futuro energético de baixo carbono. Entretanto, a descarbonização da economia global enseja incertezas a respeito das mudanças que podem influenciar a matriz energética brasileira no que se refere à velocidade da transição e o relevante papel que os combustíveis fósseis desempenham na balança comercial nacional.

**Palavras-chave:** Matriz energética; combustíveis fósseis; energias renováveis;

#### Abstract

The public policies adopted by the Brazilian government over the years, associated with the country's natural conditions, have enabled Brazil to have a large share of renewable energy sources (48.3% in 2020), which show low greenhouse gas emissions and guarantee energy safety. We point out the water source, sugarcane by-products, as well as the growth in the participation of high variability renewable sources, such as wind and solar energy, in recent years. All of this, despite the country being one of the largest oil producers in the world, which indicates the possibility of a long period of participation in the national energy matrix and as an export commodity. In the energy transition context, with an increase in renewable energies in the Brazilian energy matrix, electrification and new technologies, the challenge is to keep the use of the country's renewable resources, maintaining the high renewability of the national matrix, since it is one of the most promising options for a low-carbon energy future. Nevertheless, the decarbonization of the global economy prompts uncertainties about the changes that might influence the Brazilian energy matrix with regard to the speed of the transition and the relevant role that fossil fuels play in the national trade balance.

**Key words:** energy matrix; fossil fuels; renewable energy;

## Introdução

A matriz energética refere-se ao conjunto de fontes que alimentam um determinado sistema (uma região, um país ou no mundo) para suprir a demanda de energia. A matriz energética mundial é altamente dependente de combustíveis fósseis e poluidora. Em relação aos demais países, o Brasil encontra-se em posição vantajosa devido ao seu potencial total disponível de energias renováveis.

Entretanto, apesar de possuir uma participação de mais de 48% em energias renováveis, o petróleo possui importante participação na matriz energética nacional. Com as mudanças inerentes à transição energética global, as incertezas para o Brasil referem-se a como se posicionar para ampliar a oferta das energias renováveis e tornar-se um *player* global na direção da sustentabilidade, considerando que os investidores buscam os menores custos em energia para produzir.

O objetivo desse capítulo é analisar as características da matriz energética brasileira que figuram como variáveis importantes para a transição energética no País. Para tanto, foi feita uma revisão bibliográfica em estudos e documentos do Ministério de Minas e Energia e da Empresa de Pesquisa Energética, além de organizações especializadas, para caracterizar a matriz e identificar possíveis implicações das mudanças globais em curso no setor de energia.

O contexto da energia no Brasil indica uma matriz com alto potencial para renováveis, que precisam oferecer baixo custo para expansão, e alto potencial para oferta de petróleo e gás natural. Compreender a configuração da matriz energética nacional implica identificar as oportunidades e ameaças que a transição energética, que ocorre no mundo, confere ao País. O intuito é o de melhorar o planejamento e a tomada de decisões no caminho da segurança energética e da descarbonização. Além disso, interessa aos planejadores e tomadores de decisão quatro fatores essenciais: garantir a segurança energética; assegurar baixos custos para mover o desenvolvimento do País; atrair investimentos externos e buscar a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), a denominada descarbonização da economia.

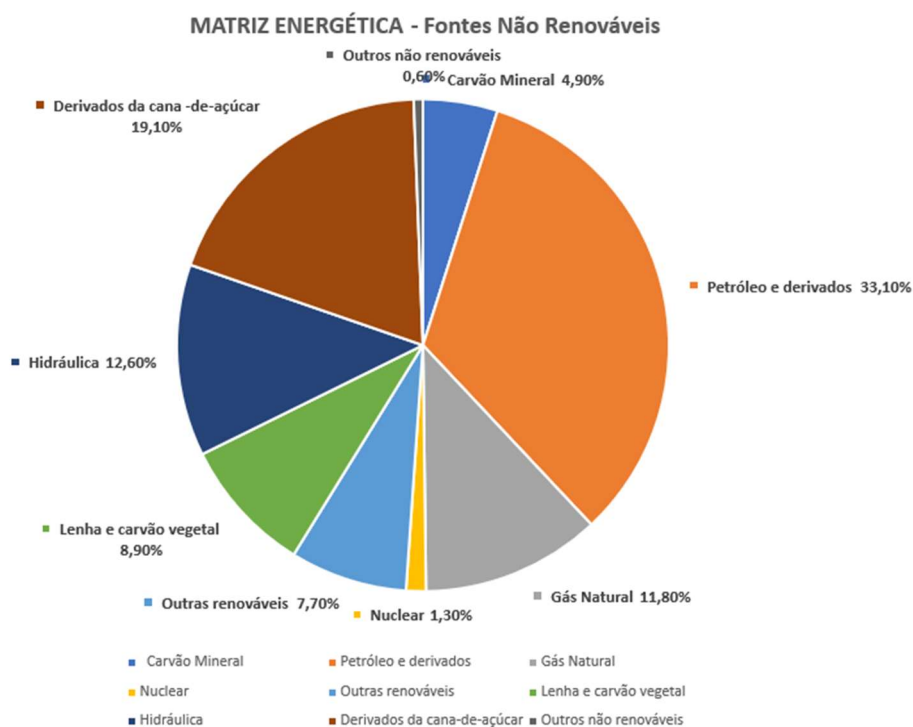
### 1. Matriz energética e a questão climática

A matriz energética mundial é composta, principalmente, por fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás natural. Em 2018, a matriz era composta 86% por combustíveis fósseis. Por serem, essas fontes fósseis, altamente emissoras de GEE, constata-se o esforço global por mudar as matrizes energéticas, descarbonizando a economia. Esse esforço é liderado pela Organização das Nações Unidas por meio do *The Intergovernmental Panel on Climate*

*Change* (IPCC), pela Agência Internacional de Energia (em inglês, International Energy Agency - IEA), por meio de documentos setoriais, pelo *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector* - IEA e pela União Europeia, por meio do *European Green Deal*, principalmente. Essas são as agências mais relevantes com iniciativas mais recentes. Os Estados Unidos anunciaram, em 2022, um ambicioso plano para descarbonização (*Inflation Reduction Act of 2022*) aliado ao plano de redução da inflação naquele país. A China (com seu *Action Plan for Achieving Carbon Peaking Before 2030*) e a Índia (com o *India's National Plan on Climate Change*) também apresentaram seus planos de descarbonização.

O Brasil, por outro lado, possui uma matriz energética com maior participação das renováveis. Somando lenha, carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras fontes, elas totalizam 48,3%, quase metade da matriz energética (Gráfico 6). A matriz elétrica é ainda mais renovável, composta 83% por renováveis em 2020 (EPE, 2021) frente a 25% apenas das renováveis no mundo (IEA, 2021).

**Gráfico 6 – Matriz Energética Brasileira 2020**

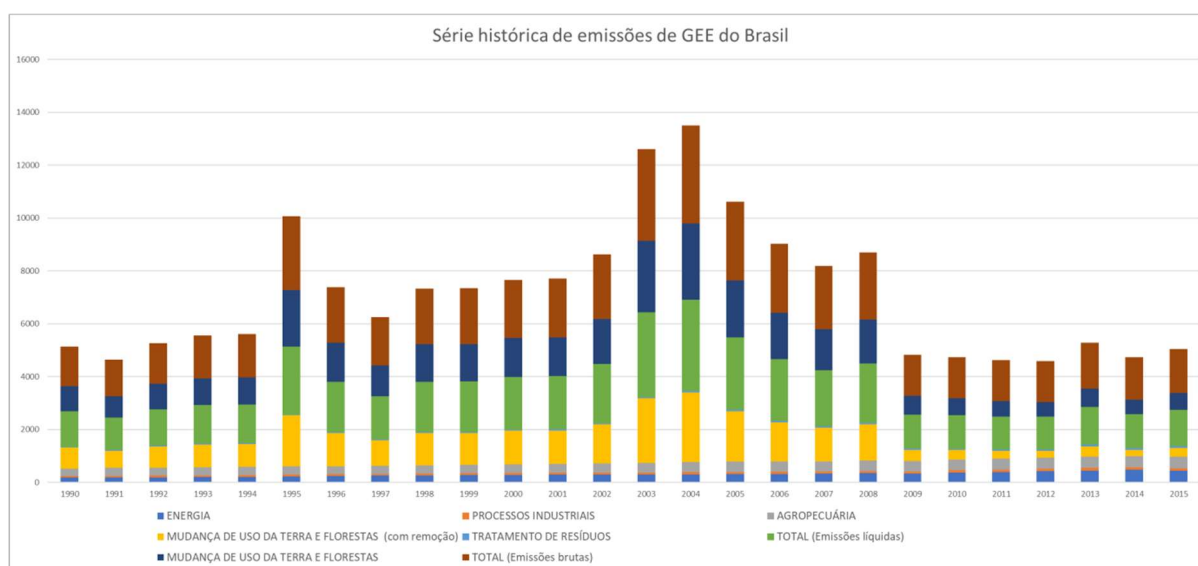


Fonte: Elaborado com dados da EPE (2021).

No que se refere à descarbonização da matriz energética brasileira, o foco é direcionado a substituição dos combustíveis fósseis utilizados no setor de transportes e a geração de energia, além de outros usos industrial, comercial, residencial e do setor público.

O Brasil, desde 1990, possui dados oficiais quanto às emissões de GEE por setor. Entretanto, desde 2016, o Inventário Nacional não teve atualização publicada (Gráfico 7). Em 2016, as emissões do Brasil totalizaram 1.467 Tg CO<sub>2</sub>e, sendo o CO<sub>2</sub> o GEE mais emitido. O setor Agropecuária contribuiu com 33,2% do total das emissões, o setor Energia com 28,9% e o setor LULUCF com 27,1%. Os setores IPPU e Resíduos contribuíram com parcelas menores de emissões, representando 6,4% e 4,5%, respectivamente. Destaca-se que a partir de 2005, houve redução das emissões do setor LULUCF, o que contribuiu para o aumento da participação relativa dos outros setores nas emissões totais desde então (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021).

**Gráfico 7 – Resultados de emissões nacionais de gases de efeito estufa (GEE), 1990 a 2015, em milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq - métrica GWP-100 anos, SAR-IPCC).**



Fonte: Elaborado com dados do Inventário Nacional (BRASIL, MCTI, 2021).

O perfil das emissões de CO<sub>2</sub> do setor de energia está diretamente relacionado ao uso de combustíveis fósseis, principalmente em transporte, indústria, geração de energia elétrica e produção de combustíveis. O setor de energia foi responsável por 18% das emissões do País em 2020 e teve uma queda forte de 4,6% em relação ao ano anterior. Isso ocorreu em resposta direta à pandemia, que nos primeiros meses de 2020 reduziu o transporte de passageiros, a produção da indústria e a geração de eletricidade. Com

quase 394 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, o setor energético retornou aos patamares de emissão de 2011 (SEEG, 2021).

Em termos de emissões brutas, foi de 9,5% o aumento das emissões de gases de efeito estufa no Brasil em 2020 em outros setores, principalmente em mudança e uso do solo. No ano em que a pandemia da Covid-19 paralisou a economia mundial e causou uma redução de quase 7% nas emissões globais, no Brasil, o total de emissões brutas atingiu 2,16 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (GtCO<sub>2</sub>e) em 2020, contra 1,97 bilhão de toneladas em 2019 (SEEG, 2021).

Entretanto, em 2021, com a retomada da atividade econômica, as emissões de GEE no setor de energia chegaram a 36,3 bilhões de toneladas no mundo. De acordo com a IEA (2022), a economia global dependeu fortemente do carvão para se reerguer, o que gerou a piora na poluição. Esse combustível fóssil foi responsável por mais de 40% do aumento geral das liberações de CO<sub>2</sub> em 2021. Isso ocorreu por conta de condições adversas do clima e do próprio mercado de energia, que apresentou picos nos preços do gás natural.

Em escala global, quase todas as regiões registraram um aumento nas emissões de CO<sub>2</sub> em 2021, com a variação anual de crescimento de mais de 10% no Brasil e Índia, e menos de 1% no Japão. As emissões na China aumentaram 5%, enquanto os Estados Unidos e a União Europeia registraram aumentos de cerca de 7% (IEA, 2022). Destaca-se que o Brasil teve aumento de emissões em mudanças do uso do solo e os demais países tiveram aumento no setor de energia, com o aumento da participação do carvão, óleo e gás.

A intenção do Brasil em reduzir suas emissões é orientada por compromissos internacionais. Em 2015, o Brasil apresentou à UNFCCC, antes da COP 21, a sua proposta de Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC) de maneira a contribuir para a concretização do que veio a ser chamado de Acordo de Paris assinado por 195 países, inclusive o Brasil, em dezembro de 2015<sup>11</sup>.

Na iNDC, o Brasil propôs ações de mitigação de emissões de GEEs e ações de adaptação aos efeitos da mudança do clima, assim como meios para implementar essas ações no País e em

---

<sup>11</sup> O documento inicial usou o termo “pretendida” porque naquele momento, essa iniciativa ainda dependia da ratificação, aceitação ou aprovação do acordo de Paris, podendo dessa maneira, sofrer ajustes

outros países em desenvolvimento, por meio de cooperação Sul-Sul e com base na solidariedade e prioridades comuns para a promoção do desenvolvimento sustentável. O ponto central da proposta brasileira foi ampliar as iniciativas de cooperação com outros países em desenvolvimento.

Ainda em 2015, a Organização das Nações Unidas apresentou a Agenda 2030, constituída por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os ODS possuem 169 metas e 230 indicadores globais com o objetivo de erradicar a pobreza e criar uma vida com dignidade e oportunidades para todos, dentro dos limites do planeta (ONU, 2015).

No que se refere à energia, o Objetivo 7 tem como foco aumentar substancialmente a participação das fontes renováveis e promover a eficiência energética. Para implementar a Agenda no Brasil, o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) criaram a Plataforma Agenda 2030 para centralizar os esforços institucionais e das organizações nacionais<sup>12</sup>. A Agenda reforçou ainda mais as iniciativas para energia limpa com indicadores de monitoramento para uso por parte dos países.

Em setembro de 2016, o Brasil ratificou os compromissos assumidos no Acordo de Paris, e as iNDCs passaram de pretensões a metas, as NDCs, as Contribuição Nacionalmente Determinada (em inglês, *Nationally Determined Contributions*). Em relação à mitigação, o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005 até o ano de 2025, além de uma contribuição indicativa, subsequente, de reduzir as emissões de GEE em 43% abaixo dos níveis de 2005, até o ano de 2030 (NDC, 2016).

Nessa ação, o Brasil apresentou as seguintes propostas adicionais de redução de emissões de gases de efeito estufa: i) aumentar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética; ii) fortalecer o Código Florestal; iii) promover o desmatamento ilegal zero até 2030; iv) reflorestar 12 milhões de hectares e v) alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética, além da energia hídrica. Na matriz total de energia a meta foi de ter uma participação de 28% a 33% até 2030, além de ações para promover a descarbonização nos setores industrial e de transporte.

Em 2020 houve a primeira atualização da NDC, com uso do 3º Inventário Nacional de Emissões, que tinha revisado os dados de emissões de 2005 para cima, totalizando 2,84 Gt de carbono equivalente. Com a redução prevista de 43%, o Brasil poderia emitir o máximo de 1,62 GtCO<sub>2</sub>eq em 2030. Em 2022, uma terceira atualização usou o 4º inventário, que revisou os

---

<sup>12</sup> <http://www.agenda2030.org.br>.

dados de 2005 para baixo, reduzindo assim o valor limite de emissões. Pela nova NDC, o País pode emitir no máximo 1,28 Gt de carbono equivalente. Esse número é bem mais baixo do que a versão de 2020 (UNFCCC, 2022).

Em novembro de 2021, durante a COP 26 em Glasgow, o governo brasileiro anunciou a meta de reduzir em 50% a emissões do País até 2030 e de neutralidade em carbono até 2050. Entretanto, não foi divulgado um plano específico por setor. O Plano Nacional de Energia 2050, publicado em dezembro de 2020, prevê um incremento das renováveis na matriz. É provável que os Planos Decenais apresentem a estratégia para alcançar a redução de emissões no setor de energia propostas na COP 26.

No contexto do setor elétrico brasileiro, mecanismos para redução de emissões se voltaram historicamente para as fontes e oferta de energia, com algumas exceções. Estas ações resultaram em uma matriz elétrica predominantemente renovável. Dentre essas ações, destacam-se o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), leilões de fontes alternativas e de reserva, o *net metering* (Sistema de Compensação de Energia), Programas de Eficiência Energética da ANEEL (PEE) e Selo PROCEL. Em muitos casos, os mecanismos não tinham o objetivo inicial de reduzir emissões, sendo o foco a segurança e a eficiência energética.

No âmbito dos combustíveis, o Brasil estabeleceu diversas políticas de incentivo à produção e uso de biocombustíveis, como o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), o Programa Nacional do Alcool (PROALCOOL), na década de 1970, e, mais recentemente, o RenovaBio. Desta forma, o País tem se colocado entre os maiores produtores e consumidores de biocombustíveis no mundo.

Estas políticas foram impulsionadas por questões de segurança energética, principalmente, e ambientais, relativas à emergência climática. Destaca-se, ainda, o Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística, lançado em 2018, que estabelece uma série de obrigações de eficiência energética, segurança e sustentabilidade para o setor automotivo, tendo como contrapartida benefícios tributários para os aderentes ao programa.

## **2. O potencial energético nacional**

Em 2018, a Empresa de Pesquisa Energética publicou a Nota Técnica Potencial de Recursos Energéticos - 2050 na qual apresentou a análise técnica, econômica e socioambiental para estabelecer os limites de aproveitamento das fontes energéticas disponíveis no Brasil até o ano 2050 para petróleo, gás natural, urânio, carvão mineral, biomassa, hidrelétrica, eólica e



solar *onshore* e *offshore*, oceânica e outras fontes promissoras (EPE, 2018). Além do referido documento com dados quantitativos, outras considerações que moldarão os resultados do setor elétricos passaram a ser feitas a seguir.

## 2.1 Petróleo e gás

Em 2006, o governo brasileiro anunciou a descoberta do pré-sal<sup>13</sup>, o que colocou o País como 6º maior detentor das reservas de hidrocarbonetos no mundo e impulsionou as pesquisas, as inovações na exploração em águas profundas e a modernização das refinarias no País, necessárias devido a diferença de densidade do petróleo do pré-sal, que apresenta um API<sup>14</sup> maior.

Em 2017, as reservas provadas de petróleo chegaram a 12,8 bilhões de barris, majoritariamente no mar. A relação entre reservas e a produção (R/P) para as reservas provadas estava em 15 anos, e para as reservas totais em 27 anos (EPE, 2018). Em relação às estimativas de produção futura, as projeções sinalizam a possibilidade de o País manter-se como grande produtor de petróleo, com mais de quatro milhões de barris por dia em todo o horizonte, a partir de 2020, patamar superior aos 2,6 milhões de barris por dia em 2016, situação que consolidaria o Brasil como um dos maiores produtores do mundo, ao passo que a agenda global passa por uma descarbonização do mix de energia.

Em 2019, o Brasil chegou a aproximadamente 15 bilhões de barris de óleo equivalente (boe), ocupando a 21ª posição no ranking mundial de países com maiores reservas de Petróleo e Gás. Entre as expectativas mais conservadoras das reservas do pré-sal, 40 bilhões de boe poderiam ser adicionados aos atuais 15 bilhões (IBP, 2019).

Estimativas indicam que a adição pode ser de até 150 bilhões de boe, levando o Brasil à posição de um dos maiores detentores de reservas de petróleo. Embora as perspectivas de reservas sejam altas, os níveis atuais de produção de petróleo no Brasil representam em torno de 3% do total mundial. Na visão do IBP (2019), ganhar agilidade na produção, nesse cenário e frente ao potencial detectado será essencial para aproveitar melhor a janela de oportunidade.

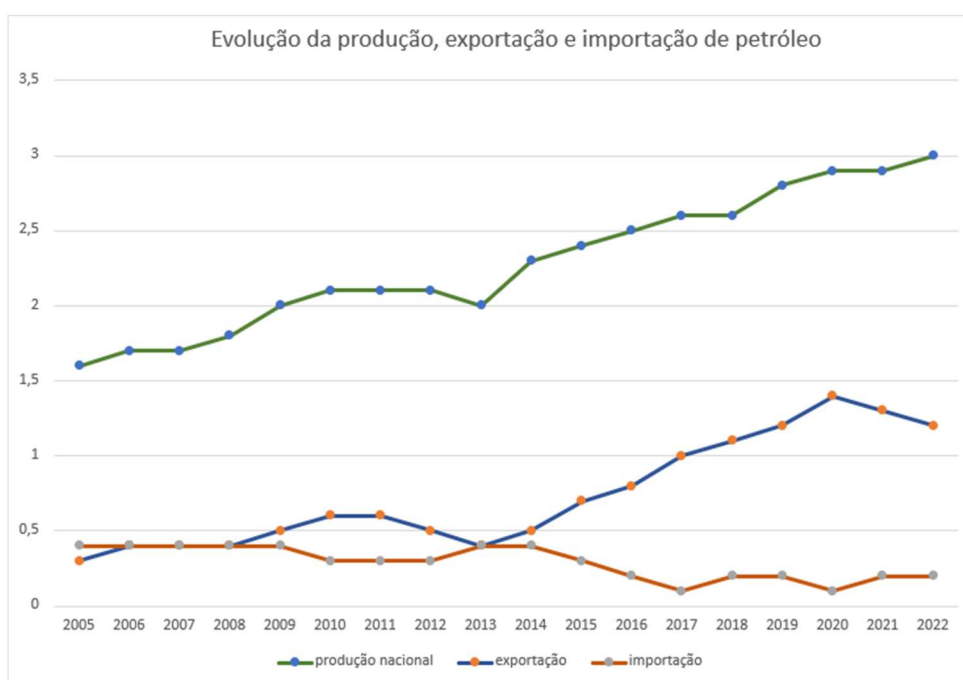
---

<sup>13</sup> Entre elas, o pré-sal, um conjunto de grandes reservatórios de óleo e gás encontrados abaixo da camada de rocha de sal, numa área que se estende de Santa Catarina ao Espírito Santo no litoral do Brasil. Esses reservatórios estão abaixo de uma camada submarina de sal, que pode ter até cinco quilômetros. Desde 2015, o pré-sal já representa mais da metade da produção de petróleo no Brasil. Os principais campos produtores do pré-sal estão localizados na Bacia de Santos, nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo.

<sup>14</sup> O Grau API é uma escala arbitrária que criada pelo American Petroleum Institute - API, juntamente com a National Bureau of Standards e utilizada para medir a densidade relativa de líquidos. Quanto mais densidade o óleo tiver, menor será seu grau API.

O gráfico 8 apresenta a evolução da produção, exportação e importação de petróleo em milhões de barris por dia entre 2005 e 2022 no Brasil. Entretanto, projeções do IBP (2019) indicam que a produção de petróleo pode atingir até 6,4 milhões de barris diários em 2030. A estimativa aponta para um aumento expressivo da produção a partir do pré-sal – justamente onde estão os principais projetos potenciais para o período, como novas plataformas nos campos de Lula e Mero e também da cessão onerosa. Os resultados dos leilões retomados em 2017 passam a ter maior impacto a partir da metade da próxima década, em função do longo período de investimentos necessário até o início da produção (IBP, 2019).

**Gráfico 8 – Evolução da produção, exportação e importação de petróleo em milhões de barris por dia.**

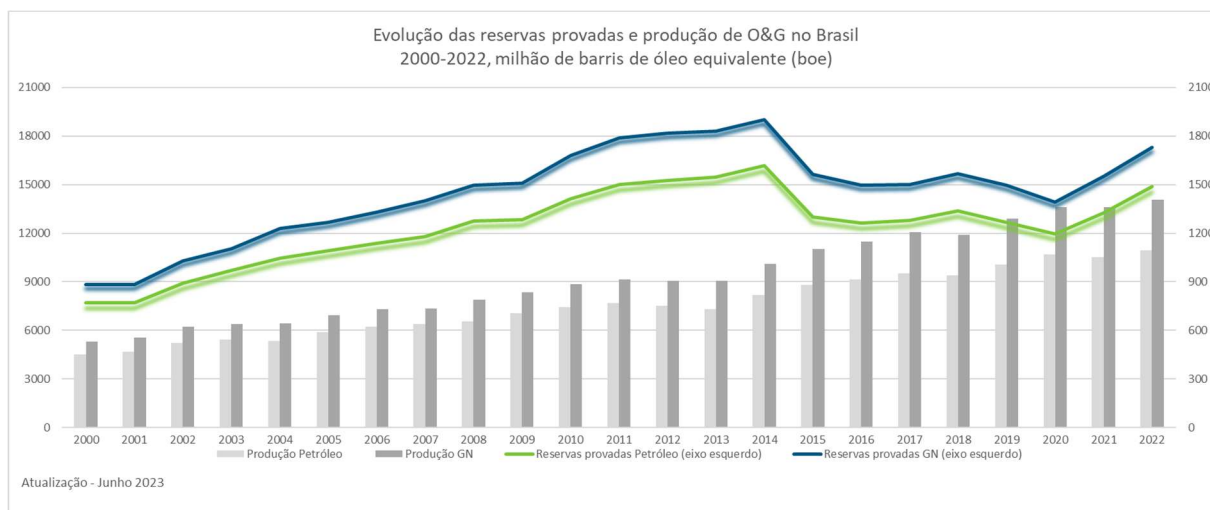


Fonte: Elaborado com dados IBP (2022).

Por sua vez, a produção de gás natural no Brasil esteve, até 2018, majoritariamente associada ao petróleo. No horizonte 2050, se antevê a exploração de áreas mais propensas ao gás natural associado e ao não convencional de bacias terrestres. Segundo a EPE (2018), a produção dos recursos convencionais, exclusivamente, poderá alcançar 200 milhões de m<sup>3</sup>/dia em 2050, cerca de quatro vezes a produção atual. Somando-se a possível produção de gás não convencional, o Brasil poderá atingir uma produção diária de até 450 milhões de m<sup>3</sup> /dia em 2050. O gás não convencional é extraído de reservatórios (rocha sedimentar com grande quantidade de matéria orgânica que dá origem ao gás) com baixíssima permeabilidade (do tipo “folhelho”).

O volume de reservas provadas e produção de óleo e gás no Brasil cresceu substancialmente entre 2000 e 2014 (Gráfico 9). A atividade exploratória foi impulsionada pelas diversas rodadas de blocos que ocorreram durante o período. A produção vem acompanhando essa intensificação de atividades no setor.

**Gráfico 9 – Evolução das reservas provadas e produção anual de Óleo e Gás no Brasil\***



Fonte: Elaborado com dados ANP (2023).

\*2000-2022, milhão de barris de óleo equivalente (boe).

O petróleo e gás são importantes combustíveis para o desenvolvimento do País. No mercado brasileiro, o setor ocupa o terceiro lugar no ranking das principais atividades econômicas no Brasil. Comparativamente, refere-se à mesma participação da pecuária – e quase três vezes maior do que a da extração de minerais metálicos. O setor de Petróleo e Gás é, ainda, o 4º colocado no ranking das exportações. Como produto, está atrás apenas da soja, dos materiais de transporte aéreo, terrestre e ferroviário e dos minérios metalúrgicos. Petróleo e derivados representaram 8% das exportações brasileiras em 2017 – mais do que a pecuária e a fabricação de veículos. Em 2017, o setor de Petróleo e Gás adicionou 21,2 bilhões de dólares a esse volume – ampliando o resultado em 46%. Além disso, 52 mil empresas estão na cadeia do setor de Petróleo e Gás, entre operadoras, fornecedores e comércio. Além disso, dez bilhões foram investidos pelo setor em pesquisa e desenvolvimento nos últimos dez anos no Brasil (IBP, 2019).

Os resultados apresentados pela Petrobras para o primeiro trimestre de 2022 indicam que cerca de 80% dos ganhos do período foram provenientes das atividades de Exploração e Produção (E&P) e 20% decorrem de ganhos provenientes dos demais segmentos, como refino.

A geração de caixa operacional medida pelo EBITDA<sup>15</sup> ajustado recorrente foi de R\$ 78,2 bilhões e o fluxo de caixa livre foi de R\$ 40,5 bilhões. O lucro líquido recorrente no trimestre analisado foi de R\$ 43,3 bilhões, refletindo principalmente a melhor eficiência operacional, maior produção e exportação de petróleo, menores custos com importação de Gás Natural Liquefeito (GNL), ganhos cambiais devido à valorização do Real frente ao Dólar e os preços do petróleo no período (PETROBRAS, 2022).

Entretanto, é um setor que requer altos investimentos. São necessários em torno de 349 milhões de reais para a perfuração de um poço do pré-sal, 8 bilhões é o investimento numa plataforma capaz de extrair 150 mil barris por dia, somando os custos da estrutura submarina e 8 bilhões é o investimento em uma refinaria com capacidade para 200 mil barris por dia. Uma unidade de produção no pré-sal é capaz de produzir 150 mil barris de petróleo por dia por 27 anos de produção. Com isso, são gerados R\$ 82 bilhões em tributos, R\$ 43 bilhões em *royalties* e R\$ 3 bilhões em PD&I (IBP, 2019).

Entre 2007 e 2017, foi gerado mais de R\$ 1,4 trilhão em arrecadação de tributos, participação especial, bônus e royalties. Com isso, 77% da arrecadação do governo federal com o setor de Petróleo e Gás é proveniente de tributos. Valores como esses inserem o petróleo no primeiro lugar da lista da arrecadação de impostos federais dentro do setor industrial. Considerando o ano de 2017, se forem somados os tributos federais, no valor de R\$ 167 bilhões, e estaduais, no valor de R\$ 79,2 bilhões, o setor de petróleo e gás teria uma participação de 4,78% no total, ao ser considerado como atividade econômica. Em 2021, a Petrobras arrecadou R\$ 203 bilhões em tributos. No que se refere à geração de empregos, são aproximadamente 800 mil empregos o total de postos de trabalho no setor. A cada R\$ 1 bilhão investido em negócios de exploração e produção são gerados cerca de dez mil empregos diretos e indiretos (PETROBRAS, 2022).

Para a PETROBRAS (2022), a certeza da transição leva a companhia a ter pressa no pré-sal. O petróleo vindo dessa camada já é responsável por mais de 70% da produção de petróleo da empresa. Até 2026, a companhia declarou que vai investir quase US\$ 40 bilhões em projetos nesta camada. Das 15 novas plataformas de produção no Brasil neste período, 12 são para produção de óleo do pré-sal. Segundo a empresa, os novos projetos trarão aumento de capacidade produtiva, mais eficiência e redução de emissões de gases de efeito estufa por unidade de petróleo produzido. Em paralelo, a empresa anunciou a ambição de atingir a neutralidade das emissões em operações em prazo compatível com o Acordo de Paris, o que

---

<sup>15</sup> EBITDA = Resultado Líquido + Juros + Impostos + Depreciação + Amortização.

inclui meta de reduzir emissões absolutas em 25% até 2030. O IBP (2019) ainda estima um potencial de 70 a 150 anos como tempo necessário para o desenvolvimento do pré-sal considerando os níveis de investimentos atuais.

A participação do setor de petróleo e gás na matriz energética brasileira, indica um maior percentual nas atividades de transporte: 84%. No setor energético, considerando as indústrias que transformam energia primária em secundária, como as refinarias, a participação é de 47%. No setor agropecuário, a proporção é de pouco mais da metade: 52%. No setor industrial, a dependência é de 30% e, no residencial, de 39%. Numa visão de médio prazo, ao dividir a demanda de energia por fonte, a parcela dos derivados de petróleo deve reduzir de 42,2% em 2016 para 36,6% em 2026. Entre as fontes que devem registrar alta neste período, estão, por exemplo, a eletricidade (de 17,3% para 20,6%), derivados da cana (de 16,9% para 18,9%) e o gás natural – que detém uma parcela menor, mas vem na esteira de aumento de participação: de 6,8% para 7,5% (IBP, 2019).

Em 2019, a participação do gás natural era de 6% na matriz energética. Considerando a baixa emissão de GEE, esse combustível passa a ser um importante insumo para a transição energética no Brasil. O gás também é um importante combustível para as térmicas garantirem o fornecimento de energia no período de intermitência da solar e da eólica.

Segundo dados da EPE (2018), em 20 anos, o setor de Petróleo e Gás ainda deve representar 46% da matriz energética brasileira – e cerca de 52% no mundo. Nesse contexto, para amenizar os efeitos das emissões, as petroleiras estão empenhadas em aprimorar a tecnologia de captura, uso e armazenamento de CO<sub>2</sub> (*Carbon Capture, Utilization and Storage* – CCUS).

Desde 2008, a Petrobras iniciou os testes para CCUS. De acordo com o relatório *Global Status of CCS 2021*, a capacidade dos projetos de CCUS em operação no mundo é de 36,6 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano (|Global CCS Institute, 2021). Em 2020, a Petrobras reinjetou sete milhões de toneladas, ou seja, cerca de 19% do total (PETROBRAS, 2021).

Assim, o desafio para a matriz energética brasileira é manter a renovabilidade da matriz, ao passo que busca tecnologias para amenizar os efeitos da exploração de petróleo. Entretanto, o gargalo encontra-se no setor de transporte, com uso intensivo de combustíveis fósseis, considerando que o etanol e os biocombustíveis apresentam baixos níveis de competitividade nos anos recentes.

## **2.2 Urânio e carvão mineral**

Dados da EPE (2018) indicam que sobre o urânio, as reservas nacionais medidas, indicadas e inferidas somam 309 mil toneladas de  $U_3O_8$ <sup>16</sup>, considerando as jazidas em exploração, havendo mais 300 mil toneladas estimadas em outros sítios, o que corresponde à 7ª maior reserva do mundo. Além disto, o País domina o ciclo do urânio, que vai da mineração à fabricação do chamado elemento combustível, podendo figurar no grupo de países prestadores de serviço para esta indústria. Com o conhecimento das atuais reservas chega-se ao potencial de 187 mil toneladas de urânio recuperável, suficientes para o atendimento do parque existente (Angra 1, 2 e 3) e mais nove novas usinas de 1.000 MW por 60 anos (vida útil estendida da planta).

Para o carvão mineral, o consumo interno nacional, ainda que pouco expressivo (9,7 milhões de toneladas em 2014 para abastecer um parque gerador com capacidade instalada de 3,2 GW), contrasta com uma ampla reserva medida de carvão mineral de 7,2 bilhões toneladas (13º no ranking mundial). As reservas poderiam alcançar até 10,1 bilhões de toneladas caso fossem realizados maiores investimentos em pesquisa e exploração. Em comparação, as reservas carboníferas no País, em termos energéticos, ultrapassam em seis vezes as reservas de gás natural disponíveis e podem garantir a operação de até 46 usinas de potência unitária de 500 MW durante 25 anos.

### **2.3 Biocombustíveis**

A partir da metade da década de 1970, com a adoção de políticas públicas específicas devido às crises do petróleo, houve a inserção dos biocombustíveis na matriz energética brasileira, para reduzir a dependência do petróleo com base em uma alternativa energética nacional. Por conseguinte, vislumbrou-se o desenvolvimento de uma cadeia industrial nacional associada ao uso dessa fonte energética, a fim de contribuir para o crescimento econômico do País. Nos anos 2000 foram adicionadas preocupações locais e globais com o meio ambiente, considerando seu papel para a redução das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE).

Na matriz nacional, os biocombustíveis concentram-se em etanol, biodiesel, bioeletricidade, biogás e biometano. Na história recente do País destacam-se três momentos importantes para o setor de biocombustíveis: o lançamento do Programa Nacional do Alcool

---

<sup>16</sup> Após a extração, em uma usina especializada, o urânio é isolado das impurezas e concentrado na forma de barras de óxido de urânio ( $U_3O_8$ ), chamadas de yellowcake.

(PROALCOOL) em 1975, uma segunda etapa em 1979, a inserção da tecnologia flex-fuel em 2003 e o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), em 2005.

De acordo com um estudo da EPE (2017), para o aumento da participação dos biocombustíveis na matriz é fundamental que haja competitividade frente aos fósseis. Nesse sentido, uma avaliação técnico-econômica de todas as etapas da cadeia permite identificar as principais ações para a redução dos preços finais dos biocombustíveis. Também é necessário considerar as suas externalidades positivas para a sua adequada precificação, considerando a geração de emprego e renda, redução de emissões de GEE, o desenvolvimento de tecnologias agrícolas, industriais e automotivas, assim como a segurança energética, dentre outros. Sob a ótica da demanda, considera-se fundamental uma maior eficiência dos veículos flex no uso do etanol, o desenvolvimento de motores híbridos flex ou dedicados a etanol e novas tecnologias, tal como a célula combustível a etanol.

Espera-se que a demanda por biocombustíveis aumente progressivamente, devido à implementação da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), que entrou em vigor no início de 2020, e visa contribuir para a regularidade do abastecimento, assim como para a participação competitiva dos diferentes biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis. Esta política cria um mercado de créditos de carbono (CBIO) para o setor de transportes, onde a parte obrigada a adquiri-los é a distribuidora de combustíveis.

Os biocombustíveis do RenovaBio são: etanol anidro e hidratado (de primeira e de segunda geração); biodiesel; biometano, bioquerosene de aviação (bioQAV), além de biocombustíveis alternativos. Por meio de seus mecanismos de funcionamento, juntamente com as políticas vigentes de misturas obrigatórias, é esperado um incremento da participação do etanol de 1ª geração e do biodiesel na matriz de transportes, assim como o desenvolvimento da produção competitiva dos demais biocombustíveis considerados nesta política.

Os novos biocombustíveis, tais como o etanol lignocelulósico, o diesel verde, o bioquerosene de aviação e os biocombustíveis para uso marítimo se apresentam como possíveis substitutos aos seus similares de origem fóssil. Ainda existem ações a realizar para a disseminação e o desenvolvimento desses novos biocombustíveis como regulamentação, desenvolvimento tecnológico e competitividade de preços frente aos substitutos fósseis.

Sobre o potencial disponível foram considerados os de base florestal, da cana-de-açúcar, óleos e gorduras, resíduos rurais e urbanos. Esses insumos são empregados para geração elétrica e para produção de biocombustíveis, e desempenham papel importante na matriz energética brasileira. Apesar de sua produção demandar grandes extensões de área, o estudo da EPE (2018) considera que a expansão da disponibilidade deste recurso no horizonte de 2050 não resultará

em desmatamento para sua produção, considerando a área já disponível e os ganhos de produtividade alcançados nos últimos anos. Em 2050, a disponibilidade de biomassa será de 530 milhões de toneladas equivalentes de petróleo, sendo os resíduos agrícolas (outras culturas, exceto cana) e a cana-de-açúcar as principais fontes (EPE, 2018).

No PNE 2050 constam os principais desafios para os biocombustíveis:

1. Concentração da produção de biocombustíveis em poucos países no mundo. Brasil e Estados Unidos são responsáveis por mais de 80% da produção mundial de etanol e são os dois maiores produtores de biodiesel (37%). O crescimento e diversificação de países na produção e no consumo de biocombustíveis é uma condição necessária para que haja aumento do comércio internacional e eventual formação de um mercado internacional de biocombustíveis.

2. Diversificação das biomassas para biocombustíveis e desenvolvimento de novos biocombustíveis. A diversificação das biomassas e o desenvolvimento de novos biocombustíveis podem trazer soluções alternativas para auxiliar na descarbonização de segmentos do transporte como a navegação e o transporte aéreo ou em bioplásticos e biomateriais. Dadas as condições edafoclimáticas favoráveis, a diversificação da produção da biomassa pode contribuir para alavancar o desenvolvimento regional do Brasil. A produção de outras oleaginosas como a macaúba e palma, além do uso de biomassas residuais, pode ampliar a produção de biocombustíveis, tanto os tradicionais quanto os novos: biodiesel base éster, diesel verde e bioQAV, etanol e biogás.

3. Diversidade de qualidade do produto e assimetria de informação. Uma das barreiras para a ampliação do aproveitamento de biomassa é a diversidade na qualidade do combustível gerado. A inexistência de padronização sobre o combustível, de modo que facilite a utilização e a validação do preço, impede seu maior aproveitamento. O mesmo vale para os biocombustíveis veiculares e sua aplicação internacional. A diversidade de qualidade leva a uma significativa assimetria de informação, aumentando os custos de transação da fonte.

4. Diversidade de atores estabelecendo políticas públicas para o setor de transportes. Diversas políticas públicas concorrem para o crescimento do setor de transportes de modo mais eficiente, limpo, confiável e economicamente sustentável, tais como a Política Nacional de Biocombustíveis, o Rota 2030, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), o Programa Nacional de Produção do Biodiesel (PNPB), o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) e a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), estabelecidos por ministérios, governos locais ou reguladores distintos. Além disso, existem avanços para a regulação de biocombustíveis alternativos, como o diesel verde. Outras iniciativas relativas ao uso de biometano e bioQAV são registradas em âmbito nacional e



algumas apenas estaduais. Estabelecer um sistema efetivo de governança dessas políticas, do compartilhamento de estatísticas e de informações é uma tarefa complexa e que exige coordenação e estratégia de comunicação entre as diferentes partes interessadas.

## 2.4 Hídrica, eólica e solar

Para o potencial hidrelétrico inventariado do Brasil, o total é de 176 GW, dos quais 108 GW já foram aproveitados (em operação ou construção) e garantiram elevada renovabilidade e baixo custo. A exploração do potencial remanescente enfrenta desafios técnico-econômicos e ambientais, como a logística, custos de implantação de vários projetos serem relativamente altos, aceitação da fonte pela sociedade e gestão dos conflitos e impactos socioambientais, tendo em vista que essa reserva fica particularmente na Amazônia. Pouco mais da metade deste potencial remanescente está localizada nas bacias hidrográficas Amazônica e Tocantins-Araguaia, onde há grandes extensões de áreas protegidas por unidades de conservação e terras indígenas e ampliam os desafios técnico-econômicos e ambientais e, conseqüentemente, os custos de implantação destes projetos.

Para a fonte eólica (*onshore* e *offshore*), o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (CEPEL, 2001) estimou um potencial de 143 GW *onshore*, a 50 metros de altura. Avanços tecnológicos e medições a alturas mais elevadas realizadas para alguns estados brasileiros mostram que este potencial é superior a 440 GW. O potencial *offshore* até 10 km da costa soma 57 GW, e no extremo, considerando a zona econômica exclusiva (com distância da costa de 200 milhas) o potencial chega a 1.780 GW. Em relação à profundidade da lâmina d'água, no intervalo batimétrico de 0 a 20 m o potencial é de 176 GW, de 20 a 50 m o potencial é de 223 GW e de 50 a 100 m o potencial é de 606 GW.

Para a energia solar (*onshore* e *offshore*), a posição geográfica do País propicia índices de incidência da radiação solar em quase todo o território nacional, inclusive durante o inverno, superiores aos observados em muitos países líderes em aproveitamento fotovoltaico (EPE, 2018), a exemplo de China, EUA e Japão.

Nas áreas *onshore* com maior nível de irradiação (6,0 a 6,2 kWh/m<sup>2</sup>/dia), o potencial é de 506 TWh/ano. Na avaliação realizada para a geração distribuída fotovoltaica residencial, foi identificado um potencial de geração igual a 287 TWh/ano. Nas áreas *offshore*, com maior nível de irradiação, o potencial é de 94.706 TWh/ano (EPE, 2018).

Em 2022, o Brasil alcançou 19 gigawatts (GW) de potência instalada em empreendimentos solares fotovoltaicos, somando usinas de grande porte e sistemas de geração

própria de energia elétrica em telhados. A fonte representa 9,6% da matriz elétrica do País. De janeiro ao início de setembro de 2022, a capacidade instalada solar cresceu 46,1%, passando de 13 GW para 19 GW, com ritmo de expansão de 1 GW por mês, o que colocou a fonte na terceira posição da matriz brasileira.

Quanto à geração heliotérmica<sup>17</sup>, a EPE estima um potencial de 661 TWh/ano para a tecnologia de cilindro parabólico com armazenamento, e de 359 TWh/ano para a tecnologia de torre solar com armazenamento.

## 2.5 Hidrogênio

O hidrogênio (H<sub>2</sub>) vem sendo reconhecido como um dos principais combustíveis para a descarbonização da matriz energética global. Por ser produzido a partir da água, principalmente, e por sua possibilidade de transporte e capacidade de produzir energia elétrica limpa e renovável, o H<sub>2</sub> é a principal aposta na União Europeia, EUA, Chile e outros países para alcançar emissões de Gases de Efeito Estufa líquidas zero em 2050, ao mesmo tempo que garantem segurança energética.

Mas, além disso, o H<sub>2</sub> é um importante fator de desenvolvimento tecnológico. Para isso, os países iniciaram, a maioria em 2020, a corrida pelo hidrogênio traçando estratégias específicas para alcançar o menor custo de produção em menor tempo. No Brasil, o tema já era objeto de estudo no Ministério de Minas e Energia (MME) desde 2005, o que posicionou o País em patamar semelhante à maioria dos países desenvolvidos.

Em 2022 foi instituído no País o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>), com seis eixos de atuação: Fortalecimento das bases científico-tecnológicas, Capacitação de recursos humanos, Planejamento energético, Arcabouço legal e regulatório-normativo, Abertura e crescimento do mercado e competitividade e Cooperação internacional.

O grupo de países com iniciativas ou políticas de suporte ao desenvolvimento do mercado de hidrogênio responde por aproximadamente 90% do PIB global. A maioria das patentes relacionadas ao H<sub>2</sub> estão concentradas na Europa, Japão e Estados Unidos.

---

<sup>17</sup> Na usina heliotérmica, grandes espelhos refletem os raios solares para um receptor de calor. Em seguida, a energia térmica é levada para um local com a presença de um líquido em elevada temperatura. Esse transforma a água em vapor (evaporação). Este vapor faz a turbina da usina entrar em movimentação, fazendo funcionar um gerador. O resultado final do processo é a geração de energia elétrica, que poderá ser distribuída e usada nas residências e indústrias.

Uma ampla gama de fontes energéticas pode ser convertida em hidrogênio. Estudos demonstram que gás natural, etanol e eletrólise da água são as conversões que oferecem maior competitividade atualmente. O hidrogênio verde<sup>18</sup> ainda é menos competitivo em relação às fontes citadas. Porém, preço e disponibilidade do gás natural oferecem vantagem competitiva. Entretanto, no médio e longo prazo, será necessário incluir tecnologias de *Carbon capture and storage* (CCS)<sup>19</sup> para oferecer H<sub>2</sub> limpo aos mercados nacional e internacional.

O transporte do H<sub>2</sub> para esses mercados ocorrerá por caminhão, trem, gasoduto ou navios em forma de H<sub>2</sub> gás, líquido e amônia. A demanda mundial por H<sub>2</sub> foi de 80 Mt em 2018, sendo China e EUA os maiores consumidores. Os principais mercados são os setores de fertilizantes, refino, metanol, mineração e metalurgia, alimentação, biocombustíveis, armazenamento de energia, máquinas e transportes. Até 2050, a previsão é que a demanda aumente 600 Mt por ano (Hydrogen Council, 2022).

Nos últimos anos foram anunciados mais de US\$ 20 bilhões em investimentos no Brasil em hidrogênio pela Eletronuclear, Raízen, Shell, Furnas, Neoenergia, Porto Açu e EDP. Dentre as iniciativas estaduais destacam-se os Governos do Ceará, Rio Grande do Norte, Grande do Sul e Minas Gerais. O H<sub>2</sub> passou a ser inserido no planejamento energético brasileiro a partir do Plano Nacional de Energia 2050 e do Plano Decenal de Energia 2031. O potencial técnico disponível é de 1,8 Gt H<sub>2</sub>/ano (horizonte 2050 normalizado), sendo 96% renovável e maior potencial técnico *offshore*, pois a maior parte do potencial técnico *onshore* é utilizado para atender às demais demandas elétricas (Ministério de Minas e Energia, 2022).

Na integração com eólica, solar e biomassa, o hidrogênio produzido pode ser usado para veículos a célula de combustível, geração de eletricidade ou aplicações industriais. Além disso, durante períodos de baixa demanda elétrica, muitos geradores de energia renovável produzem excesso de eletricidade. A eletrólise permite o armazenamento desse excesso de energia como hidrogênio que pode ser posteriormente, convertido em energia elétrica sob demanda.

Considerando todas as rotas, o Plano Decenal de Energia 2031 (Ministério de Minas e Energia, 2022) estima que a produção anual de hidrogênio a partir do saldo dos recursos energéticos no horizonte de 2050 é da ordem de 1.850 Mt/ano e aponta potencial competitivo do hidrogênio branco<sup>20</sup> em relação aos demais tipos.

---

<sup>18</sup> Aquele produzido a partir de fontes renováveis.

<sup>19</sup> Tecnologia que captura e armazena carbono e evita sua dispersão na atmosfera.

<sup>20</sup> Hidrogênio em ocorrência natural em estruturas geológicas.

No Brasil, a principal fonte de energia para produção de hidrogênio verde tende a ser a solar *offshore*, até 2050. O recurso com a maior participação potencial é o solar fotovoltaico com 79%, seguido do eólico além dos 100 km com 15% de potencial de participação. Até 2050 as renováveis *onshore* — considerando eólica, solar e hidráulica — teriam a capacidade de produzir pouco mais de 18 milhões de toneladas de hidrogênio verde por ano, enquanto as *offshore* (eólica e solar) poderiam fornecer energia para a produção de 1,7 bilhão de toneladas de H<sub>2</sub>V/ano, dos quais 1,3 bilhão apenas com painéis solares *offshore*. Fontes fósseis teriam o potencial de produzir 60 milhões, biomassa 50 milhões, e nuclear 6,9 milhões de toneladas de hidrogênio anualmente (Ministério de Minas e Energia, 2021).

Outra importante fonte é o hidrogênio natural, com a descoberta, em 2012, da existência de poços de hidrogênio, puro ou consorciado a metano, nitrogênio, hélio e outros gases, no Mali, o que reduz significativamente os custos de sua obtenção. Isso permitiu a aceleração do processo de exploração e consumo, culminando na instalação de usina de geração elétrica em 2015. Estudos sobre a ocorrência de hidrogênio natural no País começaram a despontar - estimam uma produção de 140 t/dia (51,1 kt/ano) de H<sub>2</sub> em pelo menos três pontos em Minas Gerais.

Como a avaliação desta fonte ainda está sendo iniciada no mundo, até o momento só ocorreu a identificação de emanções naturais, no Brasil, nos estados do Piauí (Miranda, 2015 *apud* EPE, 2018), Roraima, Tocantins, Ceará e Minas Gerais (Whec, 2018 *apud* EPE, 2018). Com o hidrogênio natural é possível reduzir sensivelmente os custos e, assim, evoluir mais rapidamente na geração de eletricidade sem emissões de gases responsáveis pelo aquecimento global.

De acordo com a estrutura de governança do PNH<sub>2</sub>, a coordenação e a supervisão do planejamento e da implementação das atividades do Programa ficarão a cargo de um Comitê Gestor, integrado por diversos órgãos e entidades da administração pública federal. O objetivo é fortalecer o mercado e a indústria do hidrogênio enquanto vetor energético no Brasil.

O Brasil beneficia-se da vocação natural para a produção de hidrogênio. O PNH<sub>2</sub> ganha importância devido ao compromisso do governo com PD&I para esse combustível. O bom ambiente de negócios é favorável para atrair investimentos, entretanto, ainda são necessários aperfeiçoamentos em regulação e formação de capital humano, capacitação tecnológica e logística internacional.

## 2.6 Outras fontes promissoras

Outras Fontes Promissoras segundo estudos da IRENA (2014) mostram que a conversão da diferença de salinidade dos recursos hídricos em eletricidade disponibiliza uma fonte de base (90% de fator de capacidade) e atinge o potencial internacional de 647 GW. Como a área litorânea do Brasil corresponde a cerca de 1% da mundial e considerando que a disponibilidade de água fluvial seja proporcional somente a este atributo, teríamos potencial de 6,5 GW a explorar (EPE, 2018).

No que se refere ao aproveitamento dos recursos do mar, a energia oceânica apresenta-se promissora em função da abundância desta fonte por todo o globo. A energia está disponível por meio das ondas, marés, correntes marinhas, gradientes térmicos e gradientes de salinidade, mas o atual estágio de desenvolvimento tecnológico só permitiu avaliar o potencial das duas primeiras. A estimativa a partir da extensão do litoral de cada estado da federação e da altura de onda média no ano, indica o potencial total brasileiro de ondas e marés ser estimado em 114 GW (EPE, 2018).

Considerando a diversidade de fontes e o potencial para energia no Brasil, a transição energética parece ser uma oportunidade de incrementar as energias renováveis. Entretanto, surgem incertezas a respeito da exploração de petróleo e gás e seu uso no setor de transporte, com destaque para as tendências para a concepção e priorização de governança e políticas que favorecem a descarbonização do setor.

O setor de energia no Brasil passa por um planejamento elaborado pelo governo brasileiro em basicamente dois documentos. O principal é o Plano Nacional de Energia, resultado de estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e publicado com intervalos de 20 anos pelo Ministério de Minas e Energia (MME). Ele tem como objetivo o planejamento de longo prazo do setor energético do País, orientando tendências e balizando as alternativas de expansão desse segmento nas próximas décadas. O documento é composto por uma série de estudos que buscam fornecer insumos para a formulação de políticas energéticas segundo uma perspectiva integrada dos recursos disponíveis. Outro documento é o Plano Decenal de Expansão de Energia, publicado anualmente pela EPE, com indicação quanto as perspectivas de expansão futura do setor de energia, sob a ótica do Governo no horizonte decenal. A partir do estudo do potencial energético nacional, o PNE 2050 elaborou perspectivas para o Brasil para os próximos 30 anos, considerando a oferta e demanda nacional com dois cenários principais para orientar o planejamento do setor nos próximos anos.

### 3. Os cenários no Plano Nacional de Energia 2050

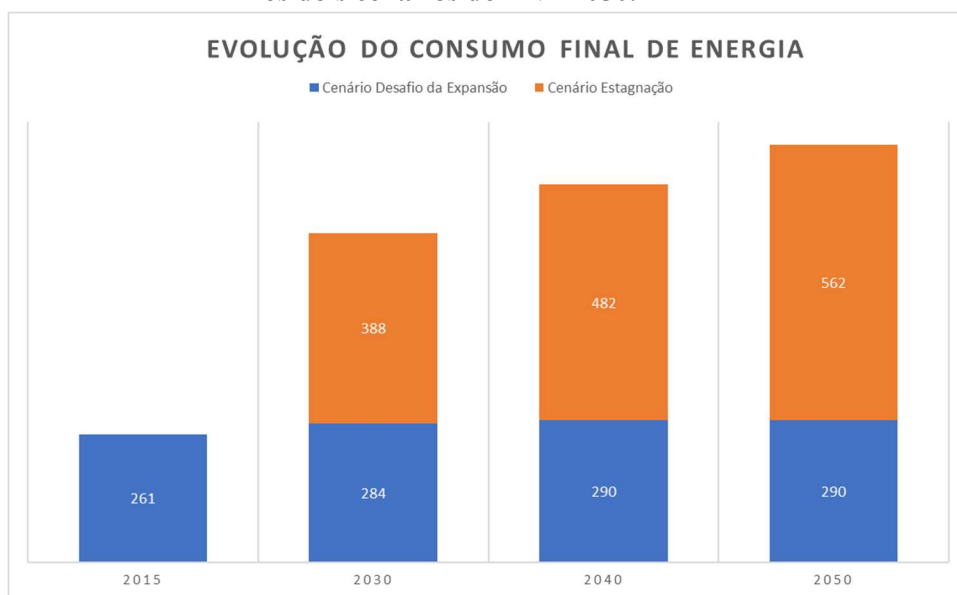
Para o Brasil, os estudos do PNE 2050 tratam a ampla gama de incertezas em relação a tecnologias, hábitos, comportamentos, modelos de negócios, regulação, entre outros no horizonte 2050 por meio de dois cenários limítrofes e resumidos por meio de duas trajetórias de evolução do consumo potencial de energia (calculado antes dos ganhos de eficiência energética).

O cenário denominado Desafio da Expansão, se caracteriza pelo desafio de se preparar para o futuro em um contexto de expansão forte da demanda bruta e como se posicionar estrategicamente para o atendimento desta demanda. Para este cenário, são conduzidas ainda análises de sensibilidade relacionadas a questões-chave para o desenho da estratégia de longo prazo de expansão do setor de energia nacional.

O outro cenário, nomeado Estagnação reflete uma trajetória em que o consumo de energia *per capita* mantém-se em torno do patamar de 2015. Neste caso, a expansão da demanda bruta de energia não é o elemento central da política energética, embora esta ainda tenha um papel em apontar caminhos para a matriz energética mais adequada aos objetivos de modicidade e sustentabilidade técnica e ambiental.

O cenário Desafio da Expansão apresenta taxa de crescimento médio de 2,2% a.a., chegando em 2050 com mais do que o dobro do consumo final de 2015, com crescimento mais acelerado nos primeiros quinze anos, com taxa média superior a 2,5% a.a. No cenário Estagnação, o crescimento do consumo final de energia aumenta de pouco mais de 10% no horizonte de análise. Tais taxas de crescimento estão associadas, entre outras a perspectivas de crescimento moderado da econômica e da demografia.

**Gráfico 10 – Evolução do consumo final de energia (em milhões de tep) nos dois cenários do PNE 2050.**



Fonte: Elaborado com dados EPE/Ministério de Minas e Energia, 2020.

O PNE 2050 aponta para um potencial energético de quase 280 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) no horizonte até 2050. Este valor representa o potencial de recursos não renováveis da ordem de 21,5 bilhões de tep e o potencial anual de 7,4 bilhões de tep de recursos renováveis ao longo de 35 anos.

A demanda de energia cresce de 300 milhões de tep para cerca de 600 milhões de tep e, ao longo de trinta e cinco anos, essa trajetória representa uma demanda de energia total acumulada do período equivalente a pouco menos de 15 bilhões de tep. Segundo a EPE, os valores podem ser ainda maiores se estudos mais detalhados do potencial de recursos energéticos forem realizados nos próximos anos (EPE/Ministério de Minas e Energia, 2020).

Assim, a oferta adicionada de energia será aquela mais competitiva para o mercado. Estudo da EPE (2018) indica que apesar da hidroeletricidade ter sido historicamente a principal fonte de geração do sistema elétrico brasileiro, representando 65% da capacidade instalada de seu parque gerador, e 80% da geração total em 2017, alguns desafios surgiram ao setor nos últimos dez anos. Sobre os desafios das Usinas Hidrelétricas (UHEs) no Brasil, a EPE (2018) pondera que:

Trata-se de uma fonte de geração renovável, economicamente competitiva, possuindo atributos benéficos ao sistema como sua flexibilidade operativa, sendo esta uma característica importante para resposta às flutuações de demanda. Por outro lado, persistem questões relevantes relacionadas ao aproveitamento hidrelétrico, tais como os desafios da exploração do potencial remanescente

na Amazônia; os elevados custos de investimentos dos projetos de grande porte nos anos iniciais de construção e a distância entre os novos aproveitamentos hidrelétricos e os grandes centros de consumo. Outras questões relacionadas a possíveis entraves a maior expansão da fonte hidráulica estão relacionadas à ausência de remuneração para os atributos de flexibilidade operativa e armazenamento energético que as UHEs fornecem ao sistema elétrico e o efeito das mudanças climáticas nos regimes hidrológicos e a vulnerabilidade do sistema frente às alterações (EPE, 2018 p. 1).

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto predominantemente por UHEs, muitas com reservatórios, e por usinas termelétricas. Esse sistema associado à extensa rede de transmissão, que interliga grande parte do País, permite o controle da energia produzida de forma centralizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que busca atender as variações da demanda de forma otimizada, considerando ainda as necessidades relacionadas à segurança do sistema e à qualidade da energia elétrica fornecida.

O racionamento de energia em 2001 mostrou a urgência por investimentos em geração e transmissão de energia elétrica. À época, as alternativas eram relativamente limitadas. Com isso, foi incentivada a ampliação do parque termelétrico, principalmente a gás, mas também pelo fato de o gasoduto Brasil-Bolívia ainda estar ocioso e contratado via take-or-pay<sup>21</sup>. Portanto, a Petrobrás se viu forçada a dar um uso rápido ao gás. Essas novas usinas, além de reduzirem a vulnerabilidade do sistema nos períodos de estiagem, poderiam ser implantadas mais rapidamente do que novas hidrelétricas (EPE, 2018).

O estudo da EPE (2018) aponta que desde o Plano Decenal de Energia 2015 há uma sensível redução do incremento da matriz com hidroeletricidade. O PDE 2015 indicava a grande maioria da expansão do parque de gerador a partir de energia hidráulica. Com previsão de 109 GW instalados em 2015 para o cenário mais conservador de crescimento da carga. Entretanto, a expansão no período se deu em maioria com usinas eólicas, biomassa e óleo combustível. Essa grande diferença se deu devido a diversos fatores, com destaque para a alta competitividade da fonte eólica nos leilões de energia, a partir de 2008, o que não havia sido antecipado no estudo. Entre o PDE 2019 e o PDE 2023, a previsão de 104 GW para o mix de geração hídrico caiu para 28,3 GW.

Questões socioambientais e o custo de instalação de usinas hidrelétricas impactaram na escolha de alternativas renováveis. Com redução dos custos dos projetos de eólica e solar, essas fontes figuraram mais atrativas para os investidores do setor. O PNE 2050 indica que:

---

<sup>21</sup> No contrato com cláusula take-or-pay, o comprador se obriga a pagar por uma quantidade mínima de produção especificada contratualmente, mesmo que o insumo não seja entregue ou consumido.



o grupo com maior facilidade de aproveitamento totaliza pouco mais 24 bilhões de tep, sendo 11 bilhões de tep de recursos não-renováveis. São incluídos neste grupo: os recursos convencionais descobertos e contingentes de petróleo, os recursos convencionais descobertos do gás natural, a parcela lavrável das reservas de carvão mineral medidas e indicadas e as reservas medidas e indicadas de urânio de Lagoa Real/Caetité (BA) e Santa Quitéria (CE), levando-se em conta as perdas de mineração e de beneficiamento. No caso dos recursos renováveis, que alcançam 13 bilhões de tep, são incluídos: as UTEs a biomassa, as UHEs que não apresentam interferências em áreas protegidas, a solar fotovoltaica e a eólica onshore, as PCH e o potencial de eólica offshore considerando as áreas com até 10 km de distância da costa (EPE/Ministério de Minas e Energia, 2020, p. 19).

O PNE 2050 estima que, com amplas oportunidades à sua disposição, ainda que com custos e benefícios bastante variados, os planejadores e decisores do setor energético devem escolher as ações mais custo-efetivas, evitando apostas concentradas aparentemente mais promissoras, mas que podem levar ao risco de trancamento tecnológico, quando se deixa de investir em soluções alternativas potencialmente superiores.

Dessa forma, o PNE 2050 preconiza um desenho da transição para economia de baixo carbono que seja vantajoso, abrangente e inclusivo, mantendo os preceitos de segurança energética, de forma a incorporar novas alternativas que reduzam a intensidade de carbono na economia, tais como eficiência energética, resposta da demanda, recarga inteligente, smart grid, além de considerar o uso de biocombustíveis, as possibilidades de eletrificação dos transportes e o desenvolvimento de cidades inteligentes. Nesse sentido, as recomendações do PNE 2050 para a transição energética incluem:

#### **Quadro 7 – Transição Energética - Recomendações do Plano Nacional de Energia 2050**

**1. Produzir curva de custo de abatimento de emissões de GEE.** Realizar um inventário das atividades, em todos os setores, para confirmar seus potenciais de contribuição e os custos de transação, assegurando a efetiva noção das medidas capazes de remover as barreiras que atualmente impedem a implantação das atividades de mitigação de baixo custo, em particular, ações de eficiência energética, que reduzem o consumo e os gastos com energia.

**2. Promover contínua avaliação de alternativas para o posicionamento nacional em negociações internacionais sobre combate às mudanças climáticas.** Reforçar os estudos do Plano Nacional de Energia como instrumento de revisão e aperfeiçoamento contínuos da estratégia de longo prazo para descarbonização do setor energético brasileiro no longo prazo, tomando em consideração as trajetórias mais custo-efetivas para o País, observando diretrizes estratégicas de longo prazo. Avaliar a combinação de instrumentos tais como Comando e Controle (normas, padrões etc.), Incentivo ao

Mercado (precificação do carbono, comércio de certificados de emissão), além de políticas diferenciadas em termos tributários e de financiamento.

**3. Monitorar as políticas de mitigação para o setor de energia.** Estabelecer monitoramento das políticas públicas voltadas à descarbonização da matriz energética brasileira, provendo insumos para avaliação de efetividade das mesmas e identificando pontos de ajuste.

**4. Estruturar novos produtos, fomentar ações de eficiência energética e inovação relacionados com mitigação.** O Renovabio é um exemplo de criação de novos produtos, como o Crédito de Descarbonização (CBIO), com o intuito de obter a gradual descarbonização da matriz energética por meio de mecanismos de mercado. No caso do setor elétrico, deve-se avaliar a estruturação de mecanismos de mercado e inovações na rede elétrica de transmissão e distribuição do Sistema Interligado Nacional que viabilizem matriz elétrica ainda menos emissora, como certificados de energia. Potencializar medidas de eficiência energética, haja vista a boa relação custo-benefício para mitigação de emissões. Inserir planejamento com redes de pesquisa e inovação sobre o tema, além de aprimorar o modelo regulatório e comercial na direção de induzir as escolhas dos agentes que levem à maior eficiência na produção e consumo de energia por meio de inovações (tecnológicas, de processo, de mercado ou regulatórias) que estejam condizentes com estratégias de adaptação.

**5. Mapear as iniciativas, banco de informações e riscos associados à transição para economia de baixo carbono.** Entende-se como necessário o mapeamento de políticas, planos e programas capazes de contribuir para uma transição energética. Este mapeamento abrangente pode orientar ações para internalização das externalidades relativas à emissão de carbono. A elaboração de mapa dos riscos e o apoio ao desenvolvimento de ações necessárias para a implementação da transição para economia de baixo carbono são desejáveis e monitoramento dos seus resultados.

**6. Articular com outros setores e tomadores de decisão na área para garantir a coerência e consistência das políticas para implementação de medidas de descarbonização.** A economia de baixo carbono extrapola o setor de energia e implica transformações na estrutura produtiva. Importante haver uma sinergia entre as políticas energéticas e os demais setores para a condução do processo de descarbonização.

**7. Estimular as possibilidades que o uso do hidrogênio permite para a descarbonização** de setores como: transportes, indústria química, residencial, bem como de geração de matéria prima “limpa” para a indústria, como por exemplo, o setor de siderurgia, entre outros. É importante destacar que, de acordo com o Hydrogen Council, o hidrogênio é a base da transformação energética, podendo contribuir com as mudanças necessárias para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em 60% até 2050, considerando um aumento da população mundial para aproximadamente 11 bilhões de pessoas.

Fonte: EPE/Ministério de Minas e Energias, 2020.

As considerações do PNE 2050 indicam que o planejamento para a transição energética no Brasil requer incremento de ações. Por outro lado, as questões ambientais impõem urgência às mudanças na matriz energética.

O cenário Estagnação mostra que o crescimento da potência instalada no sistema centralizado ocorre de forma concentrada no horizonte até 2030, refletindo, em grande parte, os projetos contratados no período entre 2015 e 2019. Entretanto, a matriz elétrica em 2050 continua predominantemente hidráulica tanto em termos de capacidade instalada quanto de geração (no período médio), com emissões de GEE decrescentes no período, também como resultado do descomissionamento de usinas termelétricas a combustíveis fósseis ao longo do horizonte (EPE/Ministério de Minas e Energia, 2020).

O PNE 2050 testou o Cenário Expansão considerando o aumento da oferta totalmente com energias renováveis. O cenário 100% renovável mostra que uma matriz elétrica praticamente 100% renovável poderia ser alcançada no sistema centralizado em 2050 desde que a complementação de potência (de 77 GW a 85 GW de capacidade instalada em 2050) também fosse feita a partir de fontes renováveis. A parcela não-renovável da matriz (de cerca de 0,5% da capacidade instalada em 2050) corresponderia às termonucleares do complexo de Angra, já que no horizonte de 2050, elas ainda não teriam sido totalmente retiradas do parque de geração nacional. Uma outra possibilidade menos restritiva seria permitir a expansão de qualquer tecnologia de geração que não produza emissões, como, por exemplo, as tecnologias com sequestro e armazenamento de carbono (CCS) (EPE/Ministério de Minas e Energia, 2020).

O PNE 2050 conclui que a ampliação da oferta hidrelétrica não conseguirá acompanhar o ritmo de crescimento da demanda por energia no Brasil ao longo das próximas décadas, resultando em gradual perda de participação relativa na matriz nacional. No entanto, o parque hidrelétrico existente, com seus estoques de água nos reservatórios, conectado a um sistema de transmissão de dimensões continentais, seguirá sendo ativo extremamente valioso para a competitividade do suprimento de energia elétrica no Brasil.

As hidrelétricas podem, dentro de certos limites, aumentar ou diminuir sua geração para ajudar a compensar a variação das outras fontes renováveis, permitindo utilizar mais eficientemente os recursos renováveis disponíveis e reduzindo a necessidade de acionamento das termelétricas fósseis. Todavia, à medida em que as energias eólica e solar ocupam uma fatia maior da matriz elétrica brasileira, é preciso rever a forma de utilizar os reservatórios das hidrelétricas, pois a demanda por flexibilidade operativa vai aumentando significativamente.

#### 4. Captura e Armazenamento de Carbono

A tecnologia de Captura e Armazenamento de Carbono (em inglês, *Capture and Carbon Storage* - CCS) ou Captura e Utilização de Carbono (em inglês, *Carbon Capture and Utilization* - CCU), figura como principal aposta para setores difíceis de descarbonizar. Ela tem se tornado a solução para o setor de óleo e gás, principalmente, com o objetivo de evitar que CO<sub>2</sub> seja lançado na atmosfera no momento da exploração dos combustíveis fósseis.

As técnicas de CCS envolvem as etapas de separação do CO<sub>2</sub> de outros gases e seu armazenamento adequado. Há diversas formas de se armazenar ou converter o CO<sub>2</sub> extraído, dentre as mais conhecidas e implementadas estão: (i) armazenamento geológico, o qual consiste em armazenar o CO<sub>2</sub> em reservatórios de óleo e gás depletados e aquíferos, ou utilizá-lo para recuperação de petróleo apurado (em inglês, *Enhanced Oil Recovery* - EOR) (ii) armazenamento em oceanos, injetando o CO<sub>2</sub> nas camadas de água mais profundas do oceano para dissolução do gás (profundidade > 1000 m) ou formação de lagos (profundidade > 3000 m); (iii) Carbonatação mineral, a qual consiste na reação entre CO<sub>2</sub> e óxidos metálicos de forma a produzir carbonatos inorgânicos estáveis; e (iv) Outras formas de conversão de CO<sub>2</sub>, utilizando-o como matéria-prima para a produção de ureia, metanol, poliuretanos, carbonato de cálcio precipitado, biomassa (algas) e na indústria de alimentos (Rackley, 2010).

#### 5. O papel do setor de transporte para a descarbonização

Outra mudança prevista é no setor de transportes no Brasil. De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2022) Se em 2021 os modelos elétricos e híbridos responderam por 1,8% do mix de vendas de leves, em 2030 eles representarão de 12% a 22%, dependendo dos cenários previstos no estudo, e de 32% a 62% em 2035. Os pesados também terão sua parcela de novas tecnologias, embora um pouco menor: 10% a 26% do mix em 2030, e de 14% a 32% em 2035. Ou seja, mesmo no cenário mais conservador, o mercado brasileiro vai demandar milhões de unidades de veículos eletrificados até a metade da próxima década. Seriam 432 mil veículos leves/ano em 2030, subindo para 1,3 milhão/ano em 2035.

A Anfavea (2022) defende que um volume dessa magnitude não poderá ser importado, o que geraria prejuízos à balança comercial brasileira, além de ociosidade ainda maior nas 58 fábricas de veículos e motores espalhadas pelo País, sem falar nas centenas de fornecedores de autopeças. Isso significa que, para alcançar metas de descarbonização, a indústria precisará entrar em um novo ciclo de grandes investimentos para se manter competitiva.

Mesmo no cenário inercial, serão necessárias altíssimas injeções de recursos em toda a cadeia (pesquisa e desenvolvimento, adaptação de fábricas, treinamento de colaboradores, desenvolvimento de fornecedores, preparação da rede de concessionários etc.) para que o Brasil abasteça seu mercado local e se consolide como um polo exportador dessas tecnologias para os países vizinhos, e até de outros continentes. Este movimento tecnológico ligado à descarbonização abre uma grande janela de oportunidades para outros investimentos no Brasil, como a indústria de semicondutores e baterias avançadas, já que o País possui matérias-primas para produzir esses componentes, que possuem alta demanda mundial. Isso estimularia P&D em toda a cadeia e o surgimento de *startups*, promovendo um grande ciclo de empreendimentos e uma revolução tecnológica no País, beneficiando vários setores, não só o automotivo. Porém, mesmo no cenário mais otimista de convergência global, com quase 2,5 milhões veículos eletrificados vendidos em 2035, a renovação natural da frota será muito lenta (ANFAVEA, 2022).

A frota circulante de leves ainda terá quase 80% de motores flex (gasolina/etanol), enquanto praticamente 90% dos caminhões e ônibus nas ruas continuarão consumindo diesel. Logo, a demanda por etanol e álcool anidro (presente em 27% na gasolina) exigirá altos investimentos da indústria sucroalcooleira, algo em torno de R\$ 50 bilhões em 15 anos. O mesmo raciocínio vale para os produtores de diesel e biodiesel. Além disso, serão necessários investimentos significativos e mandatórios na produção de HVO (diesel de origem vegetal) para a frota circulante. Ficou comprovada pelo estudo da Anfavea a necessidade de instalação de ao menos 150 mil carregadores para atender os veículos eletrificados até 2035, o que implica investimento de aproximadamente R\$ 14 bilhões.

Além disso, é necessário gerar e distribuir energia de fontes limpas para suprir a frota de elétricos, que criará uma demanda adicional de 7.252 GWh ou 1,5% de toda a energia gerada atualmente. Considerando todos os aspectos destacados no estudo de descarbonização da Anfavea, a Associação infere que o Brasil, com uma política industrial de Estado adequada e bem planejada, poderá promover um novo ciclo de investimentos nos próximos 15 anos superior a R\$ 150 bilhões (ANFAVEA, 2022).

## **6. O potencial dos minerais críticos**

Silva et al. (2023) em um estudo do Serviço Geológico Brasileiro publicou uma visão geral do potencial dos minerais críticos no Brasil. No que se refere a Terras Raras (TR), o Brasil é o terceiro país com maior reserva conhecida em 21 Mt. No entanto, o Brasil é menos relevante

na produção de TR em escala mundial. A produção nacional vem principalmente de monazita e, em 2020, foram produzidas e vendidas no mercado internacional 708 t desse mineral.

Em Níquel (Ni), o Brasil possui reservas significativas e é um importante *player* no mercado global para esse mineral. O País detém cerca de 17% das reservas declaradas e 6% de todos os recursos de níquel do mundo. Além disso, o País tem uma forte indústria de níquel, com cinco operações de mineração e vários projetos em diferentes estágios de exploração.

Para Lítio (Li), a produção de concentrado do mineral em 2021 atingiu 112.779 t. O minério mais importante é a espodumena, seguida pela ambligonita, petalita e lepidolita. A Companhia Brasileira de Lítio – CBL reportou uma reserva mineral de 4 Mt e capacidade para produzir 36.000 t/ano de concentrado de espodumênio em a Mina Cachoeira em operação na região do Médio Jequitinhonha, Minas Gerais. Na mesma região, a Sigma Lithium informou estimativas de recursos minerais (medidos + indicados) de 77 Mt. Os impostos arrecadados pelas operações de mineração de Li no Brasil saltaram de US\$ 195.725 em 2020 para US\$ 5.723.786 em 2022, principalmente devido aos processos de mineração desenvolvidos na região de Nazareno pela AMG Brasil, sul de Minas Gerais. No entanto, a previsão é de um crescimento significativo em breve com a entrada de produção das jazidas da Grota do Cirilo da Sigma Lithium e a expansão dos negócios da AMG Brasil na região de Nazareno. Existem áreas potenciais no nordeste do Brasil (Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba) com mais de cem corpos pegmatíticos contendo Li identificados.

## **7. Principais Políticas públicas e regulamentação**

Um importante aspecto para a velocidade da transição é a implementação de políticas públicas que incentivem as renováveis e a disponibilidade de regulamentação para novas tecnologias e inovações. Sobre o estado da arte da regulamentação e políticas públicas que favorecem a transição energética tem-se o seguinte quadro-síntese:

### Quadro 8 – Principais políticas públicas e regulamentação

Tema	Regulamentação
Biogás	PL 3865/2021
Gás natural	Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021 (Nova Lei do Gás)
Eólica offshore	PL 576/2021
Geração distribuída	Lei 14.300/22
Captura de carbono	Projeto de Lei 1425/2022
Mercado de carbono	Decreto nº 11.075/2022
Hidrogênio	Sem regulamentação aprovada
Bioquerosene	Sem regulamentação aprovada
Biometano	Resolução 685 da ANP (2017)
Eficiência Energética	Lei 9.991/2000, Lei nº 10.295/2001; Decreto nº 4.059/2001; Plano Nacional de Eficiência Energética, Lei 13.280/2016
Planos de mitigação das mudanças climáticas	DECRETO Nº 11.075, DE 19 DE MAIO DE 2022
Mercado livre de energia (médio e grandes consumidores)	Lei nº 9.074/1995
Abertura Mercado Livre de energia	Projeto de Lei 414/2021,
Modernização do Setor Elétrico	Consulta Pública nº 33/2017 (Aprimoramento do marco legal do setor elétrico), Portaria nº 187/2019, PLS
Mistura de etanol anidro	Lei nº 8.723/1993; Lei nº 13.033/2014
Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel – PNPB	Lei nº 11.097/2005; Lei 13.263/2016; Resolução CNPE nº 23/2017
Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE	Resolução CONAMA nº 18/1986; Lei nº 8.723/1993
Leilões de renováveis	Lei nº 13.755/2018
Digitalização na Produção e Uso de Energia	Sem regulamentação aprovada
Tecnologias de armazenamento de energia	Sem regulamentação aprovada
Tema	Política Pública
Hidrogênio	Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)
Combustíveis de baixo carbono	Combustível do Futuro
Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica	PROINFA
Sustentabilidade para o setor automotivo	Rota 2030
Eficiência energética	Programa Brasileiro de Etiquetagem, PROCEL, CONPET, PNeF
Redução das emissões de GEE	Contribuição Nacionalmente Determinada – NDC
Biocombustíveis	RenovaBio
	Programa de Apoio à Renovação e Implantação de Novos Canaviais – PRORENOVA,
	Programa de Apoio ao Setor Sucroalcooleiro – PASS, Plano Conjunto de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico – PAISS

Fonte: Elaboração própria.

O Plano Nacional de Energia 2050 é o principal orientador para as políticas públicas necessárias para o setor. O plano destaca que deficiências no desenho de mercado e arcabouço regulatório e institucional não potencializam a transição energética e há necessidade de articulação entre planos e políticas setoriais de energia e P&D. Ainda há a necessidade de avanços para modernização do setor elétrico, abertura do mercado livre de energia, hidrogênio,

bioquerosene de aviação, biogás, eólica offshore, geotermia, fusão nuclear, sistemas de armazenamento e digitalização de energia.

## **8. Desafios para a Transição Energética no Brasil**

A transição energética traz desafios e oportunidades ao Brasil. O Estado e o governo brasileiro podem atuar na remoção de barreiras à entrada de novas tecnologias para veículos e novos combustíveis, principalmente aquelas alinhadas com a economia de baixo carbono, considerando que o principal foco de emissões no setor de energia no País está no setor de transporte.

O PNE 2050 (EPE/Ministério de Minas e Energia, 2020) aponta que para novos combustíveis, é necessário facilitar o acesso adequado à infraestrutura de distribuição, oferecer condições que permitam a produção, a disponibilização e a comercialização de combustíveis e, eventualmente, o fomento a políticas de incentivo de utilização em frotas governamentais. É necessário ainda promover o devido mapeamento e o conhecimento das tecnologias, seja por meio de P&D, implementação de projetos pilotos, parcerias entre centros tecnológicos e empresas privadas, universidades, etc.

O documento também preconiza incentivar a identificação de possíveis nichos de mercado, avaliando-se os prováveis impactos econômicos, sociais e ambientais oriundos do uso de novas tecnologias. Entre elas, pode-se citar veículos elétricos a pilha a combustível com base em biocombustíveis e gás (gás natural e biometano), veículos a biocombustíveis avançados (etanol lignocelulósico, diesel verde) e GNL (EPE/Ministério de Minas e Energias, 2020).

Além disso, o PNE 2050 registra a importância de aprimoramentos no armazenamento de energia, no desenvolvimento e na ampliação de redes inteligentes, na infraestrutura de tecnologia da informação, na automação e em possível captura e uso de carbono. Dado o papel relevante do Brasil no mundo no âmbito da produção de biocombustíveis, rotas tecnológicas de produção de biocombustíveis avançados, assim como tecnologias veiculares que aproveitem o potencial nacional de produção devem estar na pauta dos formuladores de políticas públicas.

Ainda, o PNE 2050 identificou que o desenho de mercado e arcabouço regulatório e institucional atuais não potencializam a transição energética. Deve-se reconhecer que as novas tecnologias enfrentam, com frequência, barreiras não-econômicas como escassez de informação, aversão ao risco tecnológico, falta de previsão regulatória ou restrições/normas associadas ao paradigma tecnológico anterior (por exemplo, exigências de renovação periódica de frota de ônibus ou de equipamentos de controles de poluentes não aplicáveis).



Os processos de inovação em curso apontam para uma nova revolução industrial, que envolve eletrificação, automação, conectividade e renovabilidade/descarbonização. Ainda que promissoras, muitas dessas inovações enfrentam desafios econômicos e competitivos, sendo necessário monitorar sua dinâmica de preços e de penetração no mercado.

Nesse sentido, é conveniente identificar e promover oportunidades de negócios associados às vantagens competitivas do Brasil, bem como desenvolver novas vantagens custo-efetivas. Para que seja possível potencializar os benefícios da transição há o desafio de buscar o alinhamento estratégico para garantir um ambiente de negócios atrativo e inovador, com capital humano preparado para superar os desafios do novo paradigma tecnológico. Conseqüentemente é preciso desenvolver a capacitação em desafios relacionados à digitalização, automação, conectividade, segurança cibernética, mercados competitivos, etc. Destaca-se ainda, que a multiplicidade de dimensões envolvidas na promoção do processo de transição energética demanda esforço de coordenação de políticas setoriais de energia.

## **Conclusão**

A transição energética indica oportunidades e desafios para o Brasil. O País pode figurar como principal produtor global com energias renováveis, fornecer biocombustíveis e hidrogênio a outros países, bem como reduzir a emissão de GEE na exploração de óleo e gás com mecanismos de captura e armazenamento de carbono.

Os transportes passam a ser o foco para eletrificação com redução de emissões do setor de energia. Além disso, as mudanças na matriz nacional também envolvem a ampliação das renováveis eólica e solar, desconcentrando o foco em hidrelétricas vigente no passado.

Apesar das enormes reservas de óleo e gás, o recurso renovável com a maior participação potencial a ser explorado é o solar fotovoltaico e eólico. Assim, a multiplicidade de dimensões envolvidas na promoção do processo de transição energética demanda esforço de coordenação de políticas setoriais de energia com aqueles referentes à esfera econômica, científico-tecnológica, educacional, industrial e ambiental, entre outras.

Assim, os desafios ao Brasil indicam a dependência do desenvolvimento econômico para investimentos em inovação tecnológica. Além disso, a velocidade da transição energética no País envolve a competitividade dos preços das energias renováveis em detrimento dos combustíveis fósseis e, conforme demonstrado, regulação e políticas públicas incentivadas e coordenadas, em parte, pela governança ambiental global.

## Referências

ANFAVEA. **Anuário da indústria automobilística brasileira** (2022). Disponível em: Anuário ANFAVEA 2022-422-0.pdf. Acessado em agosto/2022.

BRASIL, MME, ANP. **Painel Dinâmico de Recursos e Reservas de Hidrocarboneto**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos/reservas-nacionais-de-petroleo-e-gas-natural> (2023). Acessado em julho de 2023.

BRASIL, MCTI. Resultados do inventário Nacional de emissões de Gases de Efeito Estufa por Unidade Federativa (2021). Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/arquivos/LIVRORESULTADOINVENTARIO30062021WEB.pdf>. Acessado em agosto/2022.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **RenovaBio: Biocombustíveis 2030. Nota Técnica: Papel dos biocombustíveis na matriz**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-155/EPE%20-%20NT1%20-%20PAPEL%20DOS%20BIOCOMBUST%20-%20ARQUIVO%201.pdf>. Acessado em agosto/2022

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

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo Documento de Apoio ao PNE 2050**. (Dezembro de 2018). Disponível em: [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br). Acessado em março/2022.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR\\_RecursosEnergeticos%202050.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR_RecursosEnergeticos%202050.pdf). Acessado em agosto/2022.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Caderno de Preços da Geração 2021**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-622/CadernodePre%C3%A7osdeGera%C3%A7%C3%A3o\\_r0.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-622/CadernodePre%C3%A7osdeGera%C3%A7%C3%A3o_r0.pdf). Acessado em agosto/2022.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Brasília: MME/EPE, 2020. Acessado em agosto/2022.

CEPEL. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Disponível em: <http://novoatlas.cepel.br/>. Acessado em agosto/2022.

HYDROGEN COUNCIL. **Optimizing global hydrogen trade flows accelerates energy transition and reduces investment costs by US\$6 trillion across supply chain** (2022). Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/optimizing-global-hydrogen-trade-flows->

accelerates-energy-transition-and-reduces-investment-costs-by-us6-trillion-across-supply-chain/. Acessado em dezembro de 2022.

IBP. **Evolução da produção, exportação e importação de petróleo no Brasil, 2022.** Disponível em: [www.ibp.org.br](http://www.ibp.org.br). Acessado em agosto/2022.

IBP. **Relevância do petróleo para o Brasil (2019).** Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2019/08/ey-relevancia-do-petroleo-brasil.pdf>. Acessado em agosto/2022.

IEA. **Global coal demand is set to return to its all-time high in 2022.** Disponível em: <https://www.iea.org/news/global-coal-demand-is-set-to-return-to-its-all-time-high-in-2022>. Acessado em agosto/2022.

IEA. **Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level, 2022.** Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf>. Acessado em agosto/2022.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **Status Global do CCS 2021.** Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>. Acessado em agosto/2022.

PETROBRAS. **Desempenho financeiro – 1º semestre de 2022.** Disponível em: [https://www.agenciapetrobras.com.br/upload/documentos/apresentacao\\_8chDtayCsI.pdf?\\_gl=1\\*\\_1j16ygf\\*\\_ga\\*MTIyNDQwNTA5NC4xNjYyNTExOTQw\\*\\_ga\\_9TG5WL85H3\\*MTY2MjUxMTk0Mi4xLjEuMTY2MjUxMjA4MC4yNi4wLjA](https://www.agenciapetrobras.com.br/upload/documentos/apresentacao_8chDtayCsI.pdf?_gl=1*_1j16ygf*_ga*MTIyNDQwNTA5NC4xNjYyNTExOTQw*_ga_9TG5WL85H3*MTY2MjUxMTk0Mi4xLjEuMTY2MjUxMjA4MC4yNi4wLjA). Acessado em julho de 2022.

PETROBRAS. **Pressa no Pré-sal, 2022.** Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/pressa-no-pre-sal.htm>. Acessado em: out de 2022.

RACKLEY, Stephen A. **Carbon Capture and Storage.** Butterworth-Heinemann. ISBN 978-1-85617-636-1. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-19306-6>, 2010.

SEEG, **Análise das emissões brasileiras de e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020 gases de efeito estufa.** Disponível em: [https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG\\_9/OC\\_03\\_relatorio\\_2021\\_FINAL.pdf](https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf). Acessado em agosto/2022.

SILVA, G.F.; Cunha, I.A.; Costa, I.S.L. (Orgs.) 2023. **An overview of Critical Minerals Potential of Brazil.** Serviço Geológico do Brasil, Brasília – DF, 2023. 23pp.

UNFCCC. **Nationally Determined Contributions Registry (2022).** Disponível em: [www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/Party.aspx?party=BRA](http://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/Party.aspx?party=BRA). Acessado em agosto/2022.

## Capítulo 4 – Forças motrizes, fatores-chave, tendências e incertezas-críticas para a transição energética no Brasil 2040.

*The future is always present, as a promise, a lure and a temptation.”*  
—Karl Popper

### Resumo

Buscar compreender a transição energética do século XXI envolve identificar as principais forças do ambiente, ou fatores-chave, forças-motrizes, tendências e incertezas-críticas que estão estreitamente relacionadas com as mudanças que estão ocorrendo no setor energético e com as decisões dos principais atores do setor. Analisar a transição energética envolve estudar aspectos futuros, considerando as mudanças ainda em andamento e as incertezas sobre a velocidade da transição, esta última como um aspecto especialmente relevante para cumprir as metas de descarbonização, garantir eficiência e segurança energética. O objetivo deste capítulo é identificar as principais variáveis que definem os contornos da transição energética no século XXI no Brasil. Assim, seguindo os passos do método de cenários da *Global Business Network*, foram identificadas, por meio de entrevistas não estruturadas e questionários, as forças motrizes, fatores-chave, tendências e incertezas para a transição energética no Brasil 2040.

**Palavras-chave:** energia; cenários; transição energética;

### Abstract

Trying to understand the energy transition of the twenty-first century involves identifying the main forces of the environment, or key factors, driving forces, trends and critical uncertainties that are closely related to the changes taking place in the energy sector and with the main social actors' decisions in the sector. Analyzing the energy transition involves studying future aspects, because the changes are still ongoing, and are still surrounded by uncertainties about the transition speed. The speed of the transition in Brazil is a particularly relevant aspect to meet the decarbonization goals, to ensure efficiency and energy safety. The aim of this chapter is to identify the main variables that define the outlines of the energy transition in the twenty-first century in Brazil. Thus, following the steps of the *Global Business Network* scenario method, through unstructured interviews and questionnaires, were identified the driving forces, key factors, trends and uncertainties for the energy transition in Brazil 2040.

**Keywords:** energy; scenarios; energy transition;

### Introdução

A partir da análise de como a transição energética está acontecendo em escala global, o presente capítulo ocupa-se de iniciar as primeiras etapas do método da *Global Business Network* (GBN) para elaborar os cenários possíveis para o Brasil.

Da revisão bibliográfica feita em livros e periódicos, a partir dos termos “Revolução Energética” e “Transição Energética” foi possível identificar as principais forças que impulsionam as mudanças na matriz energética global. Não há uma explicação clara para a preferência dos autores por um termo ou outro. Nos primeiros trabalhos acadêmicos sobre o assunto prevalecia o termo “Revolução”. Em trabalhos recentes e principalmente entre governos e organismos internacionais, o termo “Transição” parece estar institucionalizado.

Os trabalhos sobre transição energética indicam os fatores-chave para a transição em curso. A revisão feita na base *Web of Science* e portal de periódicos CAPES com os termos “*Energy Revolution*” e “*Energy Transition*” indica que há pelo menos 20 anos, os estudos nesse campo tiveram aumento significativo, indicando as mudanças no setor de energia. A transição em curso, segundo os autores, envolve, principalmente, a descarbonização, aumento das renováveis, inovação tecnológica, eficiência energética, eletrificação e políticas públicas.

**Quadro 9 – Fatores-chave da transição energética no século XXI**

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Ano</b>	<b>Fatores-chave</b>
A. Grubler, N. Nakicenovic	<i>Decarbonizing the global energy system</i>	1996	Descarbonização, preferências do consumidor, mudança tecnológica, políticas públicas
A. Grubler	<i>Transitions in energy use</i>	2004	Descarbonização, inovação
Geert Verbong, Frank Geels	<i>The ongoing energy transition: Lessons from a socio-technical, multi-level analysis of the Dutch electricity system (1960–2004)</i>	2006	Renováveis, inovação, políticas públicas
Igor Bashmakov	<i>Three laws of energy transitions</i>	2007	Eficiência energética, custos da energia
A. Grubler	<i>Energy transitions</i>	2008	Eficiência energética
M. Levi, E. C. Economy, S. O'Neil and A. Segal	<i>Globalizing the energy revolution: how to really win the clean-energy race</i>	2010	Energia limpa, políticas públicas, custos, inovação
R. Fouquet	<i>The slow search for solutions: lessons from historical energy transitions by sector and service</i>	2010	Inovação, mudanças tecnológicas, custos da energia
Sonja Van Renssen	<i>An energy revolution</i>	2011	Descarbonização, renováveis, eletrificação, preço do carbono, CCS, políticas públicas
Barry D. Solomon, Karthik Krishnab	<i>The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook</i>	2011	Eficiência energética, Smart Grid, esgotamento e custo do petróleo, mudanças climáticas, políticas públicas
Robert C. Allen	<i>Backward into the future: The shift to coal and implications for the next energy transition</i>	2012	Custo da energia, inovação tecnológica, cooperação, política públicas, capital humano

Arnulf Grublerab	<i>Energy transitions research: Insights and cautionary tales</i>	2012	Políticas, inovação, cooperação, uso final da energia, eletrificação, eficiência energética
Jian-KunHe	<i>Objectives and strategies for energy revolution in the context of tackling climate change</i>	2015	Mudanças climáticas, renováveis, descarbonização
F. Meneguzzo, R. Ciriminna, L. Albanese, M. Pagliaro	<i>The great solar boom: a global perspective into the far reaching impact of an unexpected energy revolution</i>	2015	Energia fotovoltaica
Varun Sivaram and Teryn Norris	<i>The clean energy revolution: fighting climate change with innovation</i>	2016	Inovação, Acordo de Paris, renováveis, eletrificação, políticas públicas
Roger Fouquet	<i>Historical energy transitions: Speed, prices and system transformation</i>	2016	Preço da energia, escolha dos atores
A.B. Gallo, J.R. Simões-Moreira, H.K.M. Costa, M.M. Santos, E. M.Santos	<i>Energy storage in the energy transition context: A technology review</i>	2016	Armazenamento de energia, aspectos regulatórios
Bin Chen, Rui Xiong, Hailong Li, Qie Sun, Jin Yang,	<i>Pathways for sustainable energy transition</i>	2019	Economia e gestão de energia sustentável, Geração e consumo de energia renovável, Impactos ambientais dos sistemas de energia e Veículo elétrico e armazenamento de energia.
Maria Mercedes Vanegas Cantarero	<i>Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: A roadmap to accelerate the energy transition in developing countries</i>	2020	Eficiência, acessibilidade, confiabilidade dos sistemas de energia, participação social

Fonte: Elaboração própria.

Para trabalhar os resultados da pesquisa bibliográfica, o método da *Global Business Network* (GBN) de construção de cenários foi aplicado para reunir a variáveis mais importantes e mais incertas para a o Brasil. O método é composto por oito etapas essencialmente qualitativas. Schwartz (2006) inicia o estudo dos cenários prospectivos com as seguintes etapas:

1. identificação da questão principal. Nesta etapa, os especialistas definem o foco da análise, aquilo que é considerado estratégico para o desempenho da organização em um determinado período. Geralmente envolvem futuros de longo prazo, em que há bastante incerteza a respeito das variáveis do sistema em análise.

2. a segunda etapa consiste em identificar os fatores-chave que interessam à organização. São selecionados os principais fatores que podem afetar as decisões a serem tomadas.

3. identificação das forças-motrizas. Essas forças originam-se principalmente nas categorias sociedade, tecnologia, economia, política e ambiente. Como organização, há pouco controle sob as forças-motrizas, mas há necessidade de reconhecê-las e compreender seus efeitos.

4. a quarta etapa é descobrir os elementos predeterminados ou tendências e as incertezas-críticas. As tendências são elementos que não dependem de qualquer cadeia de eventos, ou seja, sua ocorrência parece certa, não importando qual seja o cenário. As incertezas-críticas são variáveis que podem causar grande impacto nos cenários. São perguntas para as quais a resposta não contém certeza.

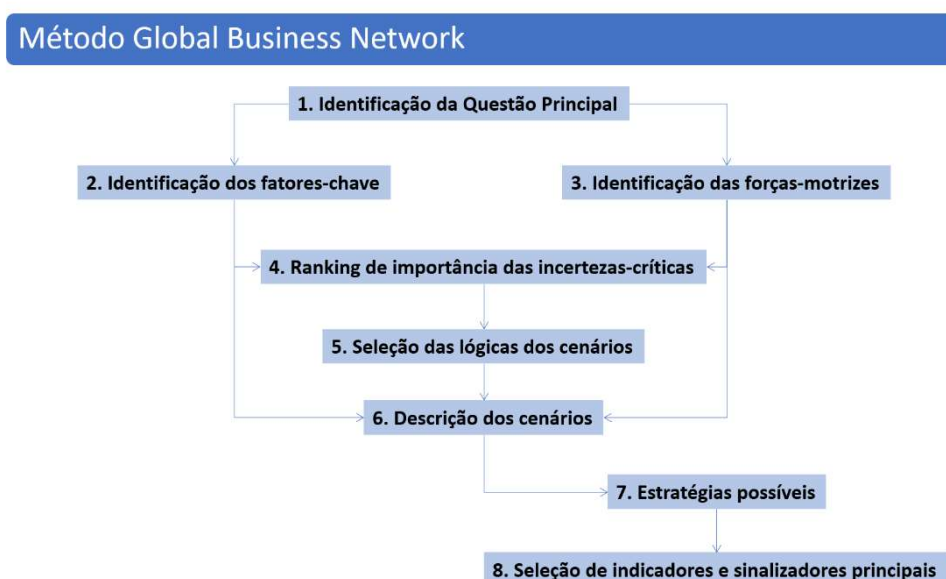
5. com a seleção dessas variáveis mais importantes e de alto impacto, o próximo passo é desenhar o enredo dos cenários. Nesta etapa, as variáveis são colocadas em matriz e permitem visualizar aquelas combinações interessantes aos tomadores de decisão.

6. após a seleção das variáveis e a construção das possibilidades lógicas, os cenários passam a ser descritos de forma narrativa, uma “história contada” de como o mundo e o sistema em análise evolui até o horizonte projetado na formulação da questão principal.

7. a penúltima etapa envolve analisar as implicações dos cenários para as estratégias da organização. Nesta etapa, os cenários vão orientar qual caminho seguir ou deixar de seguir.

8. Por último, Schwartz (2006) sugere selecionar indicadores e sinalizadores que indicam a concretização de um dos cenários descritos. É uma fase de monitoramento contínuo das variáveis em que o cenário passa a ser incorporado ao processo de planejamento.

**Figura 4 – Etapas da construção de cenários no método *Global Business Network* (GBN)**



Fonte: Elaboração própria baseada em Schwartz (2006).

Para identificar as forças-motrizas, tendências e incertezas partiu-se da revisão bibliográfica sobre a terceira transição energética no século XXI (Quadro 8) e dos trabalhos de Rifkin, (2012), Smil (2016)(2017), Sachs (2010), Geller (2002) e os documentos elaborados por *World Energy Council* (WEC), *World Economic Forum* (WEF), *International Energy Agency* (IEA), *The International Renewable Energy Agency* (IRENA), *World Economic Outlook* (WEO), DNV e SHELL.

Foi elaborado um primeiro questionário para verificar as principais variáveis relevantes para o Brasil. A pesquisa foi feita durante o Encontro Nacional dos Agentes do Setor Elétrico – ENASE 2019. Com a seleção dos que responderam que conheciam o tema da transição energética, 67 questionários foram considerados na amostra. O resultado do primeiro questionário apontou as principais tendências e incertezas para o Brasil. Além disso, foram feitas entrevistas com o Ministro de Minas e Energia (MME) e servidores daquele Ministério.

Com a pandemia de Covid-19 e seus impactos na economia global, algumas incertezas-críticas passaram a ter maior relevância e importância para a velocidade da transição no Brasil. Além disso, em dezembro de 2020 o governo brasileiro publicou o Plano Nacional de Energia 2050 para orientar a política energética nas próximas três décadas e firmou, durante a COP 26, o compromisso de zerar suas emissões líquidas até 2050.

Assim, um novo questionário foi elaborado com a visão 2040 para identificar as incertezas-críticas, ou seja, aquelas de maior importância e impacto para o Brasil. Naquela oportunidade, o questionário foi encaminhado aos especialistas, incluindo os do setor de óleo e gás, que gerou uma amostra de 40 questionários respondidos por conveniência.

Na amostra por conveniência, os especialistas foram selecionados por integrarem grupo, empresa ou órgãos ligados ao setor de energia. A amostra abrange aqueles especialistas que foram mais acessíveis, colaborativos ou disponíveis para participar do processo, declararam que conhecem o tema da pesquisa “transição energética” e ofereceram suas contribuições respondendo o questionário on-line.

Após a construção dos cenários, os especialistas foram novamente consultados para avaliarem e validarem o comportamento das variáveis e seu impacto nos cenários descritos. Essa verificação foi feita em duas etapas com método Delphi. O método Delphi permite estruturar um processo de comunicação coletiva de modo que este seja efetivo, ao permitir a um grupo de indivíduos, como um todo, lidar com um problema complexo (Linstone & Turoff, 2002, p. 3), com o objetivo de encontrar consenso fundamentado entre um grupo de especialistas em relação a um determinado assunto ou problema (Facione, 1990, p. 54).

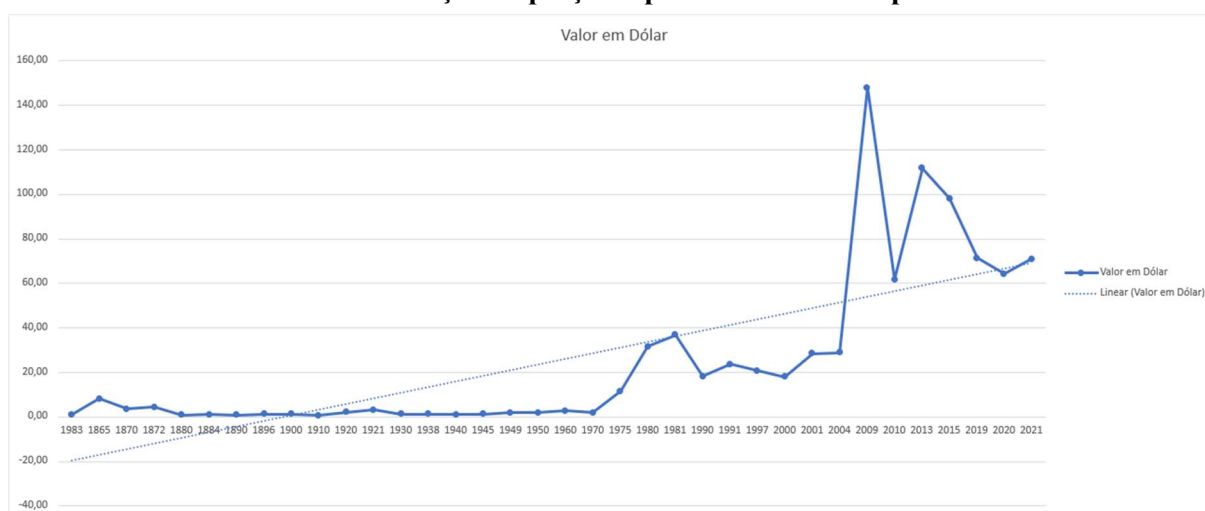


## 1. Fatores-chave

Os especialistas indicaram que preço do barril do petróleo, regulação, políticas públicas, aumento das pressões por sustentabilidade ambiental e custo das renováveis são os cinco fatores-chave que podem afetar as decisões a serem tomadas para a transição no Brasil.

O preço do petróleo é essencialmente relevante para o consumo. Durante a pandemia de Covid-19, com a queda na demanda, os preços atingiram menores patamares dos últimos anos. Entretanto, uma queda nos preços do petróleo estimula o consumo em detrimento das fontes menos poluentes. O gráfico 11 apresenta a evolução do preço do petróleo bruto US\$ por barril desde 1983 até 2021. No período total, o preço médio do barril foi de US\$ 27. A partir de 1975, após a primeira crise do petróleo, o preço médio passou a US\$ 56 e desde o início do ano 2000, os preços assumiram uma média de US\$ 73.

**Gráfico 11 – Evolução do preço do petróleo bruto US\$ por barril.**



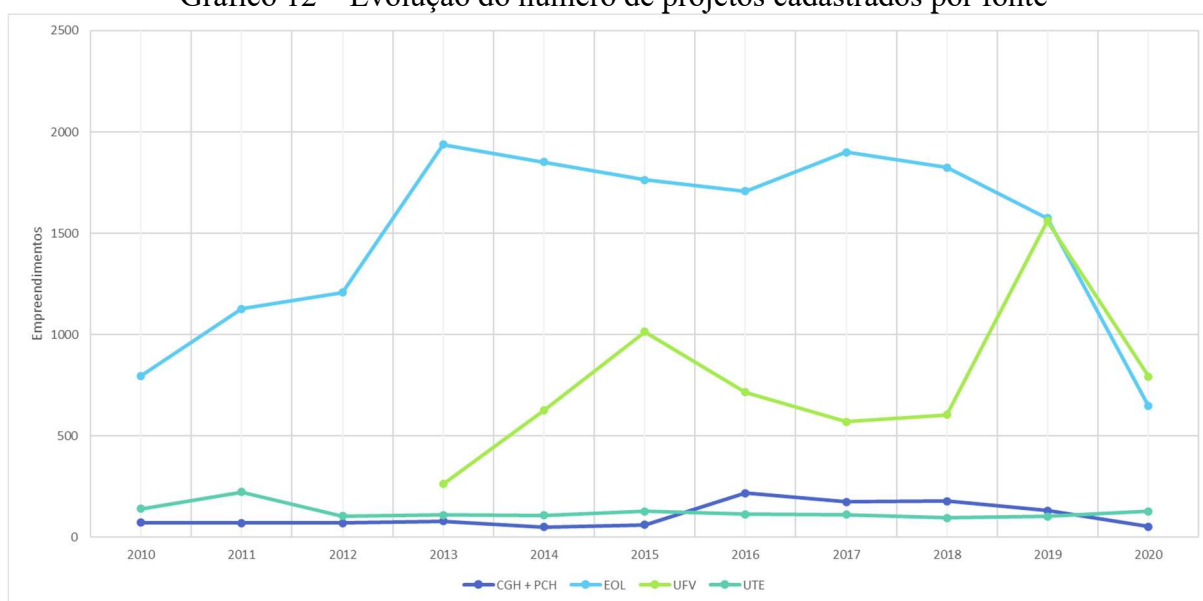
Fonte: Elaborado com dados Nasdaq (2021).

Com o conflito Rússia x Ucrânia no início de 2022, os bloqueios impostos ao gás natural russo resultaram em aumentos significativos no preço da *commodity*, ocasionando dois resultados principais: a volta das necessidades de investimentos em renováveis e segurança energética e o aumento do consumo do carvão (IEA, 2022).

A expectativa é que o consumo de carvão na União Europeia aumente pela demanda do setor de eletricidade. No entanto, a Europa representa apenas cerca de 5% do consumo global de carvão. A China e a Índia juntas consomem o dobro da quantidade de carvão que o resto do mundo combinado, com a China respondendo por mais da metade da demanda mundial (IEA, 2022).

No caso do Brasil, os baixos preços do petróleo serão importantes para a transição se aliados ao preço das renováveis e mudanças tecnológicas. Estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indica a evolução, de 2010 a 2020, do número de projetos cadastrados para participação nos leilões regulados de geração de energia elétrica, por tipo de fonte de energia (eólica; solar fotovoltaica; PCH/CGH e térmicas). Desde o ano de 2010, tem-se verificado, anualmente, expressivo crescimento no número de projetos cadastrados para eólica e solar, atingindo aproximadamente 2.000 em um mesmo ano, atribuindo à amostra significativa relevância (EPE, 2021).

Gráfico 12 – Evolução do número de projetos cadastrados por fonte



Fonte: Elaborado com dados da EPE (2021).

Segundo a EPE (2021), pela análise dos custos nivelados de energia das fontes apresentadas, considerando somente a métrica do Custo Nivelado de Energia<sup>22</sup> (em inglês, *Levelized Cost of Energy (LCOE)*), pode-se verificar que:

- as fontes eólica e solar fotovoltaica são as mais competitivas;
- as fontes que apresentam maiores faixas de LCOE são as térmicas à Biomassa, à Biogás e Eólica *Offshore*, além das fontes termelétricas a gás natural e carvão, devido a parcela de combustível e/ou a variabilidade dos CAPEX (*Capital Expenditure*, ou investimento em bens de produção);

<sup>22</sup> O Custo Nivelado de Energia é a relação entre todos os custos associados à geração de energia pelo seu SFV e a quantidade de energia que se estima que ele vai gerar ao longo de sua vida útil.

- quando comparadas com as fontes renováveis, exclusivamente pela métrica de LCOE, as usinas termelétricas com CVU<sup>23</sup> não nulo podem ser menos competitivas, mas essa métrica não leva em consideração os cálculos de outros benefícios que as usinas termelétricas agregam ao sistema elétrico como, por exemplo, em segurança energética;
- os custos com combustíveis são fundamentais para a competitividade das usinas termelétricas.

Assim, as renováveis têm obtido destaque devido aos altos preços dos combustíveis fósseis e a redução dos custos em projetos de solar e eólica. Cabe destacar que o mercado de energia no Brasil é regulado. Assim, autorizações para novos combustíveis, ligações na rede de energia, leilões, registro, autorização e concessão dos empreendimentos de geração de energia elétrica, além de tarifas e preços, dependem da consonância com aspectos regulatórios. A velocidade com que a regulação é implementada impacta diretamente na velocidade da transição no País.

Em 2017, a expansão líquida da capacidade instalada de geração elétrica foi de 7.159 MW (98% renováveis), incluídas novas usinas, revisão de potências, desativações e registros de usinas já existentes. A hidráulica ficou com 47,2% da expansão (90% Belo Monte), a eólica com 30,2% (ou 912 MW). Assim, a potência instalada brasileira de geração passou a 156,7 GW em 2017, mostrando acréscimo de 4,8% sobre 2016. Incluindo os 5,9 GW da importação contratada, a oferta total de potência passou a 163,4 GW (Ministério de Minas e Energia, 2018).

O número de usinas de Geração Distribuída (GD) chegou a 19.413 em 2017, mais do dobro do montante de 2016, de 8.908. A solar respondeu por 79,4% da expansão de potência GD. O Brasil possui ainda um grande potencial energético a ser explorado. Alguns estudos estão sendo feitos sobre as fontes eólicas e solar *offshore*, maremotriz e solar térmica (*Idem*).

Sobre o acesso, de acordo com a Pesquisa Nacional de Amostra de Domicílios – PNAD contínua no final de 2017, 99,8% dos domicílios particulares permanentes tinham acesso à eletricidade (69,8 milhões). No entanto, cerca de 140 mil domicílios ainda estão sem acesso à energia elétrica (*Idem*).

Embora a meta prevista na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) de somar 45% de fontes renováveis no consumo final já tenha sido atingida desde 2018, com o aumento da demanda projetada para o País, o aumento na participação do uso de bioenergia sustentável e da participação de fontes renováveis não-hídricas na matriz elétrica são estratégias a serem

---

<sup>23</sup> Custo Variável Unitário (CVU) é associado aos custos variáveis de combustível e de operação e manutenção de termelétricas despachadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

adotadas para ampliar a participação das renováveis na matriz e perseguir compromisso de emissões líquidas zero em 2050, conforme foi declarado pelo governo brasileiro na COP 26.

Nesse sentido, a Política Nacional de Biocombustíveis (Lei nº 13.576, de 26.12.2017) – RenovaBio estabelece a criação de metas individuais para distribuidores de combustíveis e a certificação de produção de biocombustíveis. Esses dois instrumentos estão vinculados ao CBIO (Crédito de Descarbonização por Biocombustíveis) emitido pelos produtores que a ser negociado na bolsa de valores e comprovará o cumprimento das metas por parte dos distribuidores (Ministério de Minas e Energias, 2018).

Os compromissos climáticos assumidos pelo Brasil e por outros países são especialmente determinantes para a velocidade das mudanças da transição no País. A necessidade de cumprir metas ambientais impõe que o ritmo da transição seja acelerado. E a velocidade com que essas mudanças ocorrem são de interesse dos planejadores, tomadores de decisão e partes interessadas do setor de energia.

No que se refere às mudanças na matriz energética brasileira, a regulamentação foi indicada por especialistas como fator-chave para o País. Em levantamento feito sobre regulamentos de abrangência federal, tem-se que:

1. O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), por meio da Resolução CNPE no 07, de 20 de abril de 2021, instituiu o Programa Combustível do Futuro e criou o Comitê Técnico Combustível do Futuro (CT-CF). A partir das bem-sucedidas experiências do Brasil com etanol, biodiesel e o RenovaBio, o Combustível do Futuro visa ampliar, ainda mais, o uso de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono com destaque para os seguintes objetivos:

- integrar políticas públicas afetas ao tema (RenovaBio, Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, Proconve, Rota 2030, Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular e o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural - CONPET);
- propor medidas para melhoria da qualidade dos combustíveis, com vistas a promover redução da intensidade média de carbono da matriz de combustíveis, da redução das emissões em todos os modos de transporte e do incremento da eficiência energética;
- propor metodologia de análise de ciclo de vida completo (do poço à roda) nos diversos modos de transporte;
- avaliar a possibilidade de aproximação dos combustíveis de referência aos combustíveis efetivamente utilizados;

- propor ações para fornecer ao consumidor as informações adequadas de modo a contribuir para a escolha consciente do veículo e da fonte de energia considerando o ciclo de vida dos combustíveis;
- propor estudos para criação de especificação de gasolina de alta octanagem;
- propor estudos para viabilizar tecnologia de célula combustível a etanol;
- avaliar condições para introdução de querosene de aviação sustentável na matriz energética brasileira;
- estabelecer estratégia nacional para uso de combustíveis sustentáveis no transporte marítimo; e
- estabelecer condições para uso de tecnologia de captura e armazenamento de carbono associada a produção de biocombustíveis.

2. Em julho de 2022, o decreto 11.141/2022 prorrogou para 30 de setembro de 2023 o prazo de comprovação da compra de créditos de descarbonização (CBIOS) referentes a 2022, pela regra original, a comprovação deveria ser até o final deste ano. A intervenção no mercado fez despencar os preços dos títulos do Renovabio e ser um componente importante para desacelerar o mercado de CBIOS. O que indica que, se por um lado existem avanços e intenção de ampliar a regulamentação em favor da ampliação da oferta em renováveis, por outro lado, outros mecanismos desaceleram e desestimulam a ação do mercado.

Geller (2002) advoga que a experiência com políticas para aumentar a eficiência energética e o uso de energias renováveis está se expandindo, produzindo muitos modelos e lições bem sucedidos que podem guiar os próximos passos. A expansão da adoção das políticas que se mostraram eficazes, bem como o aumento e a concentração dos esforços internacionais, poderiam acelerar a revolução energética e resultar em um futuro energético mais sustentável.

No que se refere à governança ambiental, durante a COP26, o governo brasileiro anunciou um corte de emissões de gases em 50% até 2030 e a promessa de zerar o desmatamento ilegal em sete anos. Afirmou ainda que o País atuará para chegar à neutralidade das emissões até 2050. Com isso, é esperado aumento das pressões internas e internacionais para cumprimento dos compromissos firmados. As pressões por sustentabilidade ambiental estão incluídas no rol dos fatores-chave para a velocidade dos efeitos da transição no Brasil, considerando o cumprimento das metas de descarbonização.

### 3. Forças-motrizes

Assim como nas transições anteriores, a terceira transição energética é impulsionada pelo desenvolvimento econômico e a inovação tecnológica. Essas forças originam-se, principalmente, nas categorias sobre as quais há pouco ou nenhum controle, mas há necessidade de reconhecê-las e compreender seus efeitos.

O desenvolvimento econômico, medido principalmente pelo Produto Interno Bruto de um país, passa a ser força-motriz para a transição energética. No Brasil, o Produto Interno Bruto (PIB) real a preços de mercado e com variação percentual em relação ao mesmo período do ano anterior tem uma média histórica entre 1997 e 2023 de 2,2% (IBGE, 2023).

Segundo a OCDE, a Organização está apta a 1) apoiar caminhos políticos para zero líquido 2) melhorar a adaptação e criar resiliência aos impactos climáticos 3) mobilizar finanças, investimentos e ações empresariais, 4) monitorar e medir o progresso em direção às ambições climáticas, e 5) abordagens multilaterais e multidisciplinares para construir a cooperação (OCDE, 2022). Com isso, países desenvolvidos sinalizam o caminho do desenvolvimento pautado na descarbonização da economia. Em paralelo, a inovação tecnológica é uma condição necessária para um período prolongado de crescimento econômico, aliada a uma estrutura socioinstitucional compatível com as novas tecnologias (Perez, 2002).

Cada revolução tecnológica conduziu uma profunda transformação do conjunto de tecnologias utilizadas, tanto pela simples substituição quanto pela modernização do equipamento e dos processos existentes. Além disso, cada uma dessas revoluções envolveu, ainda, uma profunda transformação nas pessoas, nas organizações e nas habilidades:

[...] each of these revolutions is accompanied by a set of ‘best-practice’ principles, in the form of a techno-economic paradigm, which breaks the existing organizational habits in technology, the economy, management and social institutions (*Idem*, p. 7).

Além de promover o crescimento por longos períodos, com as novas indústrias, uma revolução tecnológica também é capaz de guiar uma reorganização nas indústrias pré-existentes, impulsionando o aumento de produtividade e aumentando o potencial de criação de riqueza (Perez, 2010). Eventualmente, as transformações proporcionadas pelas revoluções alcançam toda a economia, de forma com que as antigas indústrias revitalizadas passam a se comportar como as novas, em termos de dinamismo, produtividade e lucratividade, por meio

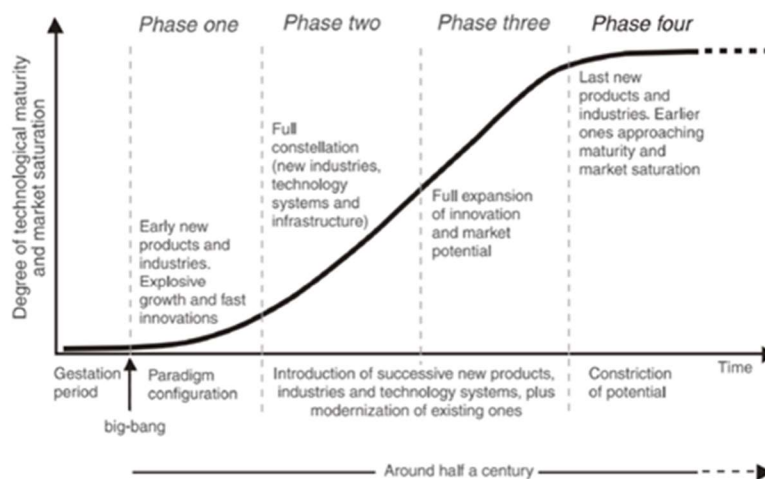
da abertura de oportunidades de inovação e da provisão de novas tecnologias, infraestruturas e princípios organizacionais (Perez, 2001; Perez, 2010).

Perez (2002) salienta que um “grande surto de desenvolvimento” (*great surge of development*) é definido como o processo de instalação e implementação de uma revolução tecnológica e do seu paradigma tecnoeconômico associado, ou seja, de propagação da revolução e seu paradigma por toda a economia, promovendo profundas mudanças estruturais em diversos âmbitos da economia e da sociedade – produção, distribuição, comunicação e consumo.

Os grandes surtos não são ciclos econômicos, mas um fenômeno sistêmico, no qual fatores sociais e institucionais desempenham importantes papéis (Perez, 2002). O fenômeno da mudança tecnológica é cíclico, com revoluções tecnológicas, paradigmas tecnoeconômicos e grandes surtos de desenvolvimento sucessivos. Independente de quão poderoso é um paradigma tecnoeconômico, seu potencial, eventualmente, será exaurido (Perez, 2002). Assim, a transição energética surge como importante impulsionadora do crescimento econômico e do desenvolvimento nacional.

A autora apresenta quatro fases do ciclo de vida de uma revolução tecnológica (Figura 5). A Fase 1 constitui um período de crescimento explosivo e rápidas inovações nas novas indústrias, revelando os princípios que definem o “senso comum” e guiam a propagação da revolução tecnológica; a Fase 2 é marcada por uma rápida difusão, dando origem a novas indústrias, sistemas tecnológicos e infraestruturas; a Fase 3 também é marcada pelo rápido crescimento, alimentado pela implementação completa do paradigma por toda a estrutura produtiva; a Fase 4 ocorre quando a revolução tecnológica chega a sua maturidade, e o dinamismo aproxima-se do ponto de exaustão, com a saturação dos mercados e os retornos decrescentes da inovação tecnológica.

**Figura 5 – Ciclo de vida de uma revolução tecnológica**



Fonte: Perez (2002).

Para a autora, estas fases podem ser classificadas em dois períodos, de aproximadamente trinta anos cada um: o primeiro, denominado período de instalação, marca a irrupção de novas tecnologias em uma economia em fase de maturidade, desestabilizando o antigo e difundindo formas novas, e superiores, de “se fazer as coisas”; o segundo, caracterizado como período de implementação, marca a renovação e reformulação de toda a economia por meio do poder modernizador do novo paradigma, possibilitando o aproveitamento do potencial máximo de geração de riqueza. Entre esses dois períodos, observa-se um “*turning point*”, no qual são realizadas as mudanças regulatórias, necessárias para facilitar e moldar o período de implementação posterior – fortemente influenciado pela política, pela ideologia e pelo jogo de poder -, possibilitando uma “era de ouro” e o completo aproveitamento do potencial da revolução tecnológica (Perez, 2002). O atual estágio da quarta revolução industrial pode acelerar o dinamismo das etapas mencionadas pela autora.

Destaca-se que a trajetória de uma revolução tecnológica não é tão suave e contínua como na Figura 5. O período de instalação de um novo paradigma é marcado por uma batalha contra o poder enraizado na estrutura produtiva, no ambiente sociocultural e nas instituições, sendo esse embate, eventualmente, vencido pelo novo paradigma que, então, se difunde por toda a economia.

Nesse sentido, o Brasil pode beneficiar-se do ciclo de desenvolvimento estimulado pela transição energética, conjugando esforços convergentes para reduzir o custo das energias renováveis, implementar regulação e políticas públicas de fomento à descarbonização do setor de energia e alinhar-se às metas para sustentabilidade ambiental.

### **3. Tendências**

Nos cenários energéticos, a seleção dessas variáveis de ocorrência certa resultou nas tendências de:

- descarbonização da matriz energética;
- aumento das renováveis (não hídrica);
- eletrificação;
- uso da tecnologia de Captura e Armazenamento de Carbono;
- implementação do mercado livre de energia;
- ampliação do mercado de carbono;
- ganhos de eficiência energética;
- aumento da demanda por energia elétrica;



- criação de empregos verdes;
- ampliação da geração descentralizada;
- pressão internacional por descarbonização;
- smart grids;
- governança global para transição energética; e
- ampliação da cadeia de minerais e suprimentos.

No Brasil, a **descarbonização da matriz energética** tem foco no setor de transportes, indústrias e geração de energia. Nesse sentido, há uma ampliação das renováveis (não hídricas) no mix energético do País. As energias renováveis são impulsionadas pela tendência de eletrificação, que se alinha à quarta revolução industrial. Para aqueles setores difíceis de descarbonizar e para ampliar a vida útil do setor de óleo e gás, a estratégia de utilizar Captura e Armazenamento de Carbono surge como solução tecnológica necessária à redução das emissões de GEE.

Entretanto, descarbonizar a matriz envolve o incremento de novas máquinas, equipamentos, baterias e veículos. Assim, é esperado o aumento da **demandas por minerais** críticos à transição energética. A Agência Internacional de Energia (2021) apontou que suprimentos de minerais críticos essenciais para as principais tecnologias de energia limpa, como veículos elétricos e turbinas eólicas, precisam aumentar acentuadamente nas próximas décadas para atender às metas climáticas mundiais. A Agência alerta que há riscos potenciais à segurança energética e que os governos devem agir agora para resolver a questão de suprimentos de minerais.

A disponibilidade de minerais como cobre, lítio, níquel, cobalto e elementos de terras raras são essenciais para uma transição acelerada para a energia limpa. O Brasil é um potencial fornecedor desses minerais, entretanto, pouco do território nacional é mapeado na escala que a mineração necessita.

O setor de energia ainda tende a participar ativamente do **mercado de carbono** quando compra ou vende créditos de carbono. Ao gerar energia limpa ou para compensar uma atividade poluidora, há um sistema de compensações de emissão de carbono. Isso se dá por meio da aquisição de créditos de carbono pelas companhias que não atingiram suas metas de redução de gases de efeito estufa (GEE) daquelas que reduziram suas emissões.

O Congresso Nacional conta com mais de uma Lei para tratar do assunto. Uma é a lei 528/2021, que institui o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE), e busca regular

a compra e venda de créditos de carbono no Brasil e outra é o Projeto de lei 412/2022, do Senado, que visa regulamentar o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões.

No que se refere à **eficiência energética**, no âmbito dos estudos do PNE 2050, estima-se que no cenário Desafio da expansão<sup>24</sup>, os ganhos de eficiência elétrica contribuam para reduzir a necessidade de 321 TWh de consumo de eletricidade (cerca de 17% do consumo total) em 2050, o que corresponderia a evitar mais de duas vezes o consumo de energia do setor industrial brasileiro em 2019 ou ainda, evitar a necessidade de expansão de capacidade instalada de geração equivalente a mais de 2,5 usinas de Itaipu em sua capacidade total (partes brasileira e paraguaia). Quando considerados os ganhos totais de eficiência energética incluindo combustíveis, estima-se que essa contribuição se situe em torno de 77 milhões de tep (13% do total de consumo de energia estimada em 2050), montante da mesma ordem de grandeza de toda a energia consumida no transporte rodoviário de carga e passageiros em 2019.

Cabe destacar adicionalmente que os cenários do PNE 2050 não possuem qualquer caráter determinativo, o que significa dizer que avanços em direções com maior contribuição da eficiência energética são desejáveis, e as metas previstas podem não ser alcançadas. A inserção da eficiência energética de forma mais acelerada no longo prazo traz desafios que se relacionam às características específicas desse recurso, que incluem, entre outras, o elevado grau de dispersão da oferta potencial, menor porte dos projetos (quando comparados àqueles ofertados por geração centralizada) com ritmo mais lento de entrada e cuja decisão de implementação é sensível, em parte desses consumidores, a aspectos comportamentais.

Nesse ambiente, a promoção de iniciativas voltadas à eficiência energética exigirá o contínuo processo de melhoria dos mecanismos vigentes no País (além da introdução de práticas inovadoras), a atenção à governança do setor energético, a coordenação entre as várias políticas setoriais (econômicas, fiscais/tributárias, financiamento, CT&I, industrial, educação etc.) nas diversas esferas institucionais (e.g., federal, estadual e municipal), o engajamento dos consumidores finais e a existência de um ambiente regulatório e financeiro para seu efetivo funcionamento. Nesse sentido, articulação e coordenação de uma engrenagem composta de diversos agentes, públicos e privados, são necessárias para que se promova um ambiente de aproveitamento acelerado dos ganhos de eficiência energética em todos os setores da economia (EPE/Ministério de Minas e Energia, 2020).

A eficiência energética pode compensar a tendência de aumento da demanda por energia nas próximas décadas. Os estudos do PNE tratam a ampla gama de incerteza em relação a

---

<sup>24</sup> Ver capítulo 3.

tecnologias, hábitos, comportamentos, modelos de negócios, regulação, entre outros no horizonte do 2050 por meio de dois cenários limítrofes e resumidos por meio de duas trajetórias de evolução do consumo potencial de energia (calculado antes dos ganhos de eficiência energética)<sup>25</sup>.

Destaca-se que, segundo IRENA e ILO (2022) os **empregos verdes** em energia renovável em 2021, no mundo, estão acima dos 12 milhões de pessoas em 2020. Quase dois terços de todos os empregos estão na Ásia, e a China sozinha responde por 42% do total global. Seguem-se a União Europeia e o Brasil com 10% cada, e os Estados Unidos e a Índia com 7% cada. O Brasil somou cerca de 1,27 milhão de empregos em energia renovável em 2021, quase tanto quanto em 2020. Com 863.100 empregos, os biocombustíveis continuaram sendo o maior componente da força de trabalho de energia renovável do País.

A produção de biodiesel no Brasil continua em expansão, atingindo a estimativa de 6,76 bilhões de litros em 2021 (ABIOVE, 2022 *apud* IRENA, 2022). Muito pouco se exporta, por falta de competitividade internacional de custos; as importações estão próximas de zero, porque apenas o biodiesel nacional é elegível para os leilões (USDA-FAS, 2021 *apud* IRENA, 2022). A produção de etanol do Brasil caiu 23% em 2021 em relação ao pico de 2019. A maior parte do etanol é feita de cana-de-açúcar, mas a produção de etanol de milho está em expansão e já representa 11% da produção total de etanol do País (estimada em 3,39 bilhões de litros em 2021, oito vezes mais do que em 2017) (USDA-FAS, 2021<sup>a</sup> *apud* IRENA, 2022). A estimativa mais recente de emprego para o bioetanol é para 2020, com 536.200 postos de trabalho ou 11.000 a menos do que em 2019 (Ministério do Trabalho e Emprego/RAIS, 2022 *apud* IRENA, 2022).

Adições recordes de 3,96 GW em 2021 elevaram a capacidade acumulada de geração de energia eólica do Brasil para 21,2 GW (IRENA, 2022). A IRENA estima a força de trabalho eólica do país em cerca de 63.800 pessoas, principalmente em construção, seguida de operação e manutenção (O&M). Cerca de 80% da capacidade instalada – e, portanto, uma parte considerável do emprego – está no nordeste do País (nos estados do Rio Grande do Norte, Bahia, Piauí e Ceará), e outros 10% no sul do Rio Grande do Sul (ABEEÓLICA, 2021 *apud* IRENA, 2022). O Nordeste (Bahia e Ceará, junto com Pernambuco) também abriga fábricas de equipamentos eólicos.

O rápido crescimento das instalações solares fotovoltaicas do Brasil continuou em 2021, com adições de 5,5 GW. Dois terços da capacidade cumulativa do país de 14 GW estavam em energia solar distribuída. Três estados no sul e sudeste (Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande

---

<sup>25</sup> Ver Capítulo 3.

do Sul) mais o centro-oeste do Mato Grosso respondem por metade da capacidade fotovoltaica distribuída cumulativa e, portanto, por muitos trabalhos de instalação. Minas Gerais é líder em instalações de grande porte, seguida pela Bahia, no Nordeste (IRENA, 2022).

A **Geração Distribuída (GD)** alcançou, em 2022, a marca de 14 GW de capacidade no Brasil, mesma potência instalada da usina de Itaipu, maior hidrelétrica em operação e responsável por cerca de 10% da energia consumida no País. São mais de 1,3 milhão de unidades geradoras espalhadas por praticamente todos os municípios, empregando atualmente mais de 400 mil pessoas em várias etapas da cadeia, consolidando a tendência de ampliação da GD (ABGD, 2022).

Com mais de 1,7 milhão de consumidores, a GD está dividida entre as classes de consumo residencial (47,4%), comercial (30,3%), rural (13,4%) e industrial (7%). Entre as fontes dos sistemas de mini e microgeração de eletricidade, a energia solar é a mais presente, representando 98,3% do total; seguida por biomassa e biogás (1%), central geradora hidrelétrica (0,5%) e eólica (0,1%).

De acordo com a Associação Brasileira de Geração Distribuída (ABGD), com os atuais 14 GW de potência instalada, a geração distribuída tem capacidade suficiente para abastecer aproximadamente sete milhões de residências ou 28 milhões de pessoas. Já a matriz solar responde por cerca de 68% da potência da modalidade, alcançando a terceira posição entre as principais fontes de energia em potência instalada no País, com chances reais de alcançar, em breve, a segunda posição das eólicas. Dos 20 GW de capacidade solar, cerca de 13,8 GW são provenientes da geração própria de energia (ABGD, 2022).

Com a ampliação da geração descentralizada, também surge a tendência de ampliar o **mercado livre de energia**, que, diferente do Ambiente de Contratação Regulada (ACR) onde estão os consumidores cativos<sup>26</sup>, o ACL (Ambiente de Contratação Livre) é formado pelos consumidores livres, que compram energia diretamente dos geradores ou comercializadores, por meio de contratos bilaterais com condições livremente negociadas, como preço, prazo, volume, etc. Cada unidade consumidora paga uma fatura referente ao serviço de distribuição para a concessionária local (tarifa regulada) e uma ou mais faturas referentes à compra da energia (preço negociado de contrato). Esse modelo de negócio incentiva a geração distribuída principalmente por energias renováveis mais competitivas.

---

<sup>26</sup> Os consumidores cativos são aqueles que compram a energia das concessionárias de distribuição às quais estão ligados. Cada unidade consumidora paga apenas uma fatura de energia por mês, incluindo o serviço de distribuição e a geração da energia, e as tarifas são reguladas pelo Governo.

As concessionárias e distribuidoras de energia estão ampliando suas redes inteligentes (**smart grids**) pelo Brasil. Os medidores analógicos estão sendo substituídos por medidores inteligentes, que permitem maior controle sobre o consumo por parte das famílias. Além disso, os sensores e dispositivos de controle à distância da rede inteligente reduzem o tempo de desligamento provocado por intempéries e outros fatores externos ao sistema, e permitem que a rede se religue automaticamente quando isso for possível e, nos casos em que não ocorra, fornecem dados para que a Companhia possa detectar e sanar eventuais problemas de desligamento. Os medidores são especialmente utilizados pelas famílias que produzem a sua própria energia solar e injetam parte da energia para a rede da distribuidora.

Um importante componente da transição energética são as mudanças de comportamento político e social que se refletem em **pressão internacional por descarbonização**. Entretanto, é uma tendência pouco analisada por especialistas no âmbito nacional. No que se refere à pressão internacional, há a necessidade de atender aos indicadores ambientais da OCDE, uma vez que o Brasil está pleiteando ser membro daquela organização (Ministério da Economia, 2022). Países como Dinamarca e Finlândia também condicionam a emissão de fundos para financiamento ambiental à apresentação de projetos e ao rigoroso cumprimento das normas ambientais brasileiras. Alemanha e França pressionam no que se refere à importação de produtos cuja origem é certificada e livre de desmatamento, o que reduz a emissão de gases de efeito estufa.

Internamente, além de movimentos da sociedade civil, tais como organizações não-governamentais e fundações, a exemplo da SOS Mata Atlântica, Instituto Socioambiental (ISA), WWF Brasil, Greenpeace Brasil, o mercado e empresas ampliam suas estratégias de ESG (em inglês, *environmental, social and governance*) para conciliar a agenda ambiental aos processos estratégicos, gestão e operação. Pesquisa ainda aponta que 78% das empresas já inserem o ESG em suas estratégias de negócio, e 59% incluem ações ESG no orçamento (Exame, 2023).

Além dos compromissos globais assumidos, principalmente no âmbito do Acordo de Paris, a pressão internacional é subsidiada pelo financiamento climático. Em 2009, durante a COP15 em Copenhague, os países desenvolvidos assumiram o compromisso de destinar USD 100 bilhões ao ano aos países em desenvolvimento. A disponibilização desses recursos é especialmente relevante para que países emergentes, como o Brasil, recebam aportes necessários para conduzir PD&I e financiar projetos com foco em descarbonização.

No nível global, a **governança** para transição energética está sendo conduzida, principalmente, por organismos internacionais como ONU e Agência Internacional de Energia

Renovável (IRENA, em inglês), bem como por colegiados como o World Energy Council, o *Global Wind Energy Council*, o *Global Solar Council* e a *Hydrogen Council*. Esses organismos apresentam principalmente estudos e documentos para orientar os países e promovem eventos para facilitar a interlocução entre eles.

No Brasil, o Ministério de Minas e Energia, por meio de iniciativas como o Combustível do Futuro, por exemplo, buscou impulsionar combustíveis de baixo carbono no País. Entretanto, com poucas entregas, dos sete subcomitês do programa, os únicos relatórios publicados são o do ciclo diesel e o de combustíveis marítimos, não há certeza de continuidade do Programa. Outra iniciativa é o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>), para coordenar as ações necessárias ao mercado de hidrogênio.

#### 4. Incertezas

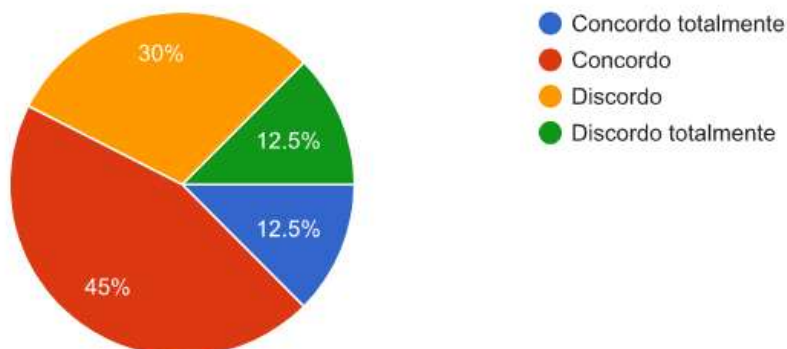
As incertezas são variáveis pouco conhecidas ou indefinidas, sobre as quais não há certeza determinante sobre a sua ocorrência. Dentre as incertezas, são denominadas incertezas-críticas aquelas que podem causar grande impacto nos cenários. Com a seleção dessas variáveis mais importantes e de alto impacto, o próximo passo é desenhar o enredo dos cenários.

As incertezas-críticas com maior impacto e importância, aquelas que impactam diretamente o caminho que o Brasil seguirá na transição energética, referem-se a:

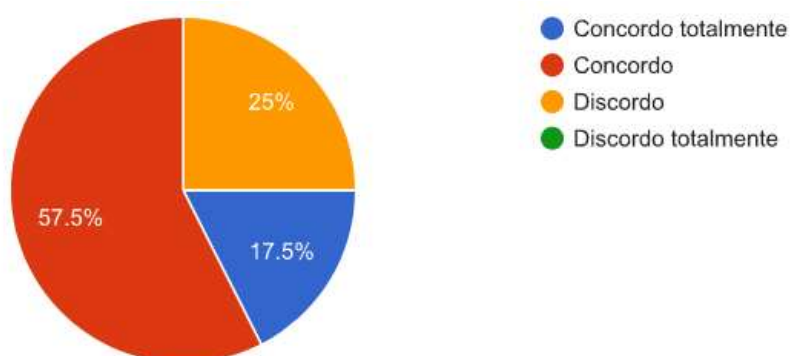
- preço do barril do petróleo;
- capacidade de investimento em PD&I;
- demanda por biocombustíveis;
- mão de obra qualificada para empregos verdes;
- redução dos subsídios ao petróleo;
- comprometimento governamental;
- políticas públicas para transição;
- governança nacional para transição;
- mudanças no portfólio da Petrobras;
- melhoria da regulação; e
- aumento dos transportes elétricos.

Essas incertezas foram levantadas em pesquisa realizada por questionário, enviada a uma lista de 250 especialistas do setor de energia (apêndice 3), que resultou em uma amostra por conveniência de 40 questionários. As seguintes perguntas foram endereçadas aos especialistas, após a seleção das variáveis mais importantes:

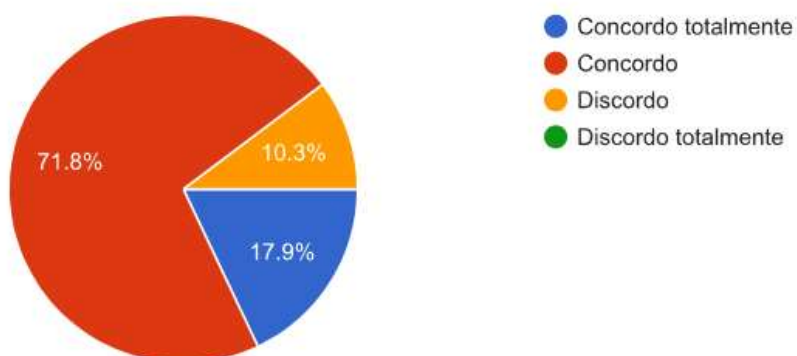
1. Até 2025, os países ricos mobilizarão 100 bilhões por ano, conforme o Acordo de Paris, para financiamento climático a países emergentes?



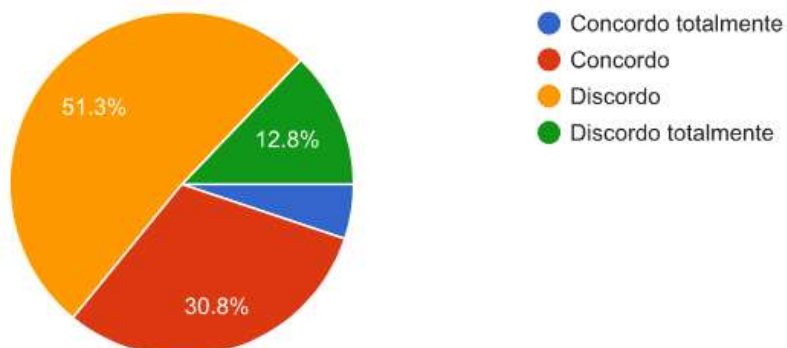
2. Os biocombustíveis (etanol, biodiesel e bioquerosene) ganham competitividade em relação aos combustíveis fósseis antes de 2040?



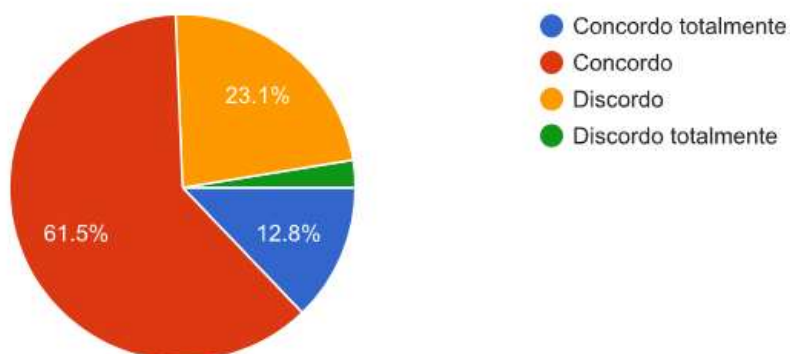
3. O Brasil alcançará 10% em ganhos de eficiência no setor elétrico até 2040?



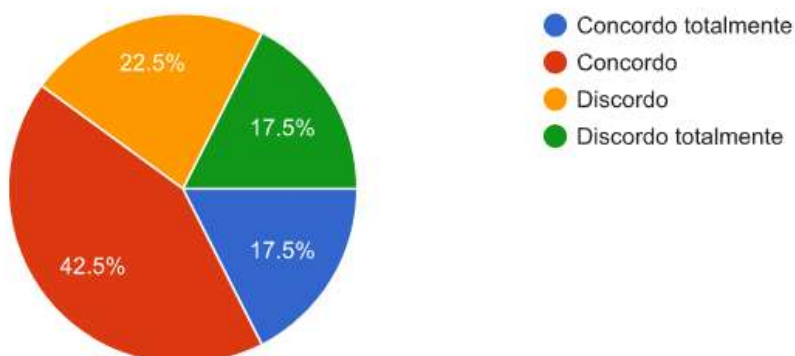
4. O preço do barril de petróleo atingirá seu menor preço em 2040? (Visão a partir de 2022).



5. Os enormes subsídios concedidos ao setor de combustíveis fósseis ao ano (no Brasil, US\$21 bi e no mundo, US\$ 5,2 tri em 2018) serão reduzidos até 2040?

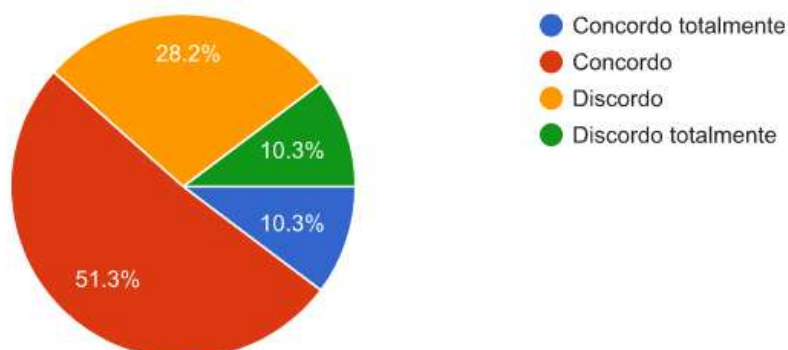


6. O governo brasileiro está comprometido com a transição energética de maneira a oferecer segurança para investimentos até 2040?

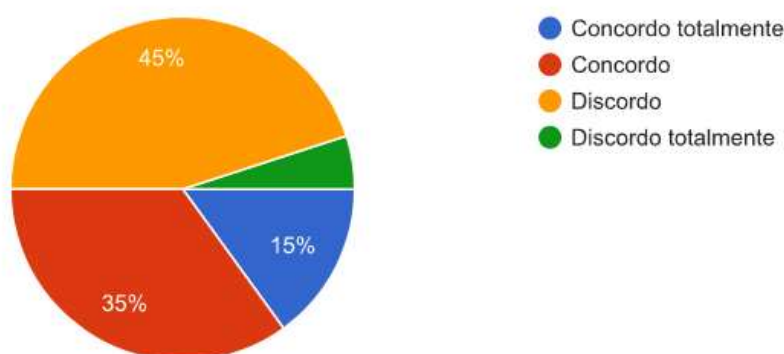




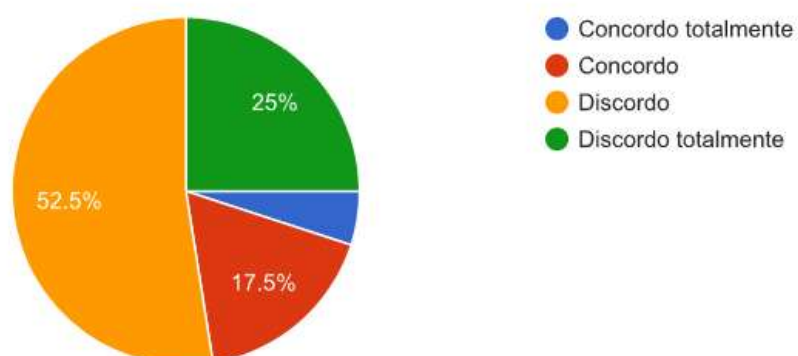
7. A Petrobrás envidará alterações significativas no seu portfólio de negócios com foco em uma matriz energética renovável até 2040?



8. Energias renováveis representarão 80% da matriz energética brasileira em 2040? (Em 2019, 46% da matriz era renovável).



9. Os carros elétricos representarão 50% da frota nacional em 2040?



A pesquisa apontou como relevante e de elevada incerteza as questões: 1) Até 2025, os países ricos mobilizarão 100 bilhões por ano, conforme o Acordo de Paris, para financiamento climático a países emergentes? 2) O governo brasileiro está comprometido com a transição energética de maneira a oferecer segurança para investimentos até 2040? 3) A Petrobrás envidará alterações significativas no seu portfólio de negócios com foco em uma matriz energética renovável até 2040? Assim, financiamento climático, comprometimento do governo brasileiro e papel da Petrobras como principal companhia de óleo e gás atuando no País, foram consideradas questões muito importantes para os cenários da transição energética no Brasil.

Foi apontada alta probabilidade de ocorrência e importância para as questões: 1) Os biocombustíveis (etanol, biodiesel e bioquerosene) ganham competitividade em relação aos combustíveis fósseis antes de 2040? 2) O Brasil alcançará 10% em ganhos de eficiência no setor elétrico até 2040?

A pesquisa também mostrou alta incerteza e alta importância para a questão: O preço do barril de petróleo atingirá seu menor preço em 2040? (Visão a partir de 2022), e para a questão: Os enormes subsídios concedidos ao setor de combustíveis fósseis ao ano (no Brasil, US\$21 bi e no mundo, US\$ 5,2 tri em 2018) serão reduzidos até 2040?

A maioria discorda que as energias renováveis representarão 80% da matriz energética brasileira em 2040 (Em 2019, 46% da matriz era renovável), e que os carros elétricos representarão 50% da frota nacional em 2040.

Para identificar as variáveis que representam incertezas-críticas, foram ordenadas as variáveis identificadas segundo seu grau de incerteza em relação ao ambiente futuro, atribuindo 1 (um) à variável com menor grau de incerteza e 5 (cinco) para aquelas com maior grau de incerteza. O mesmo procedimento foi adotado para classificar as mesmas variáveis quanto ao seu grau de importância. Para a construção dos cenários interessam aquelas variáveis mais incertas e mais importantes. A tabela 1 demonstra essa classificação.

**Tabela 1 – Classificação do grau de incerteza e importância**

<b>Variável</b>	<b>Incerteza</b>	<b>Importância</b>
Preço do barril do petróleo	5	5
Custo das renováveis	4	5
Capacidade de investimento em PD&I	3	3
Demanda por biocombustíveis	3	3
Mão de obra qualificada para Empregos verdes	3	4
Redução dos subsídios ao petróleo	2	5

Comprometimento governamental	3	5
Políticas públicas para transição	5	5
Governança nacional para transição	2	5
Mudanças no portfólio da Petrobras	1	5
Regulação	5	5
Transportes elétricos	2	4
Financiamento climático	3	3
Ganhos de eficiência energética	1	4
Aumento das energias renováveis	1	5

Fonte: Elaboração própria (vide apêndice 2).

Para elaborar o enredo dos cenários, foram selecionadas as quatro variáveis mais incertas e importantes (Tabela 1), sendo que o aumento da pressão por sustentabilidade não foi citado como de alto impacto nem alta incerteza entre os especialistas consultados. Entretanto, é um movimento percebido nas narrativas dos organismos internacionais e governos no tema da Transição Energética, por isso, neste trabalho, esta variável foi incluída nos enredos dos cenários. Assim, as variáveis com maior grau de incertezas são:

1. Preço do barril do petróleo;
2. Custo das renováveis;
3. Políticas públicas para a transição;
4. Regulação; e
5. Pressão por sustentabilidade ambiental.

A velocidade da transição energética no Brasil depende do preço do barril de petróleo comparativamente ao preço das energias renováveis. Entre renováveis e fósseis, o mercado responde à demanda com aqueles que têm os preços mais competitivos. Além disso, as políticas públicas, regulação e pressão por sustentabilidade em maior ou menor grau são incertezas críticas para os cenários 2040.

## Conclusão

O desenvolvimento econômico e as inovações tecnológicas impulsionam a transição energética no Brasil sendo que, internamente, o preço do barril do petróleo, regulação, políticas públicas, aumento das pressões por sustentabilidade ambiental e custo das renováveis são cinco

incertezas-críticas a serem observadas e acompanhadas por partes interessadas e tomadores de decisão.

O preço do barril do petróleo, a capacidade de investimento em PD&I, a demanda por biocombustíveis, a disponibilidade de mão de obra qualificada para empregos verdes, a redução dos subsídios ao petróleo, o comprometimento governamental, as políticas públicas para transição, a governança nacional para transição, as mudanças no portfólio da Petrobras, a melhoria da regulação e aumento dos transportes elétricos são variáveis importantes apontadas como fatores-chave para a transição energética no Brasil no horizonte 2040.

O Brasil pode beneficiar-se do ciclo de desenvolvimento estimulado pela transição energética, conjugando esforços convergentes para reduzir o custo das energias renováveis, implementar regulação e políticas públicas de fomento à descarbonização do setor de energia e alinhar-se às metas para sustentabilidade ambiental.

O ambiente da transição energética é complexo. As dimensões envolvidas na promoção do processo de transição energética demanda múltiplos esforço dos atores envolvidos para coordenar as ações, e assim, aproveitar as vantagens competitivas do Brasil. E que seja um movimento em prol do desenvolvimento nacional em um contexto de economia de baixo carbono. A partir da análise das forças-motrizes, fatores-chave, tendências e incertezas, o próximo capítulo apresenta os quatro cenários para a transição energética no Brasil com uma visão para o ano de 2040.

## Referências

ABGD. Associação Brasileira de Geração Distribuída. Disponível em: <https://www.abgd.com.br/portal/>. Acessado em dezembro de 2022.

ALLEN, ROBERT C. **Backward into the future: The shift to coal and implications for the next energy transition**, 2012. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301421512002054>. Acessado em dezembro de 2022.

BASHMAKOV, IGOR. **Three laws of energy transitions**, 2007. Disponível em: <https://go-gale.ez54.periodicos.capes.gov.br/ps/i.do?p=AONE&u=capes&id=GALE|A246715577&v=2.1&it=r>. Acessado em dezembro de 2021.

BRASIL. Política Nacional de Biocombustíveis (Lei nº 13.576, de 26.12.2017 - Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências.

BRASIL. Ministério da Economia. **Brasil dá mais um passo para entrar na OCDE com Plano Nacional de Política Regulatória**. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/noticias/2022/dezembro/brasil-da-mais-um-passo-para-entrar-na-ocde-com-plano-nacional-de-politica-regulatoria>. Acessado em: Fevereiro/2023.

EXAME. **Termo ESG cresceu 2.600% nas redes; descubra como aproveitar a tendência e começar carreira na área** (2023). Disponível em: <https://exame.com/carreira/termo-esg-cresceu-2600-nas-redes-descubra-como-aproveitar-a-tendencia-e-comecar-carreira-na-area/>. Acessado em: julho de 2023.

FOUQUET, R. **The slow search for solutions: lessons from historical energy transitions by sector and servisse**, 2010. Disponível em: Energy Policy, 38 (11), pp. 6586-6596. Acessado em dezembro de 2021.

GEERT VERBONG, FRANK GEELS. **The ongoing energy transition: Lessons from a socio-technical, multi-level analysis of the Dutch electricity system (1960–2004)**, 2006. Disponível em: [https://editors.eol.org/eoearth/wiki/Energy\\_transitions](https://editors.eol.org/eoearth/wiki/Energy_transitions). Acessado em dezembro de 2021.

GRUBLER, A. **Energy transitions**, 2008. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301421511006987?via%3Dihub>.

\_\_\_\_\_. **Transitions energy in use**, 2004. Disponível em: <https://pdf.sciencedirectassets.com>. Acessado em dezembro de 2021.

\_\_\_\_\_. A., NAKICENOVIC, N. **Decarbonizing the global energy system**, 1996. Disponível em: <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/4848/1/RR-97-06.pdf>. Acessado em dezembro de 2021.

GRUBLERAB, ARNULF. **Energy transitions research: Insights and cautionary tales**, 2012. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301421512002054>. Acessado em dezembro de 2021.

IBGE. **Sistema de Contas Nacionais Trimestrais (IBGE/SCN Trimestral)**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acessado em julho de 2023.

IEA. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions** (2021). Disponível em: <https://www.iea.org/news/clean-energy-demand-for-critical-minerals-set-to-soar-as-the-world-pursues-net-zero-goals>. Acessado em dezembro de 2022.

IRENA and ILO (2022), **Renewable energy and jobs: Annual review 2022**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi and International Labour Organization, Geneva.

JIAN-KUNHE. **Objectives and strategies for energy revolution in the context of tackling climate change**, 2015. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1674927815000441?via%3Dihub> Acessado em dezembro de 2022.

MENEGUZZO, FRANCESCO, CIRIMINNA, ROSARIA, ALBANESE, LORENZO, PAGLIARO, MARIO. **The great solar boom: a global perspective into the far reaching impact of an unexpected energy Revolution**, 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.98>. Acessado em dezembro de 2021.

MICHAEL LEVI, ELIZABETH C. ECONOMY, SHANNON O'NEIL AND ADAM SEGAL. **Globalizing the energy revolution: how to really win the clean-energy race**, 2010. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S030142151200225X>. Acessado em dezembro de 2021.

OCDE. **The Climate Action Monitor 2022**. Disponível em: <https://www.oecd.org/climate-action/ipac/the-climate-action-monitor-2022-43730392/>. Acessado em dezembro de 2022.

PEREZ, C. **Technological change and opportunities for development as a moving target**. CEPAL Review, v. 75, p. 109–130, 2001.

\_\_\_\_\_. **A green and socially equitable direction for the ICT paradigm**. Globelics – Global Network for Economics of Learning, Innovation, and Competence Building Systems, 2014.

\_\_\_\_\_. **Capitalism, technology and a green global golden age: the role of history in helping to shape the future**. In: JACOBS, M.; MAZZUCATO, M. (Ed.). *Rethinking Capitalism: Economics and Policy for Sustainable and Inclusive Growth*. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2016.

\_\_\_\_\_. **Innovation systems and policy for development in a changing world**. In: FAGERBERG, J.; MARTIN, B. R.; ANDERSEN, E. S. (Ed.). *Innovation studies: evolution and future challenges*. Oxford: Oxford University Press, 2013. p. 90–110.

\_\_\_\_\_. **Technological revolutions and financial capital: the dynamics of bubbles and golden ages**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2002.

\_\_\_\_\_. **Technological revolutions and techno-economic paradigms**. *Cambridge journal of economics*, Oxford University Press, v. 34, n. 1, p. 185–202, 2010.

\_\_\_\_\_. **Transitioning to smart green growth: lessons from history.** In: FOUQUET, R. (Ed.). *Handbook on Green Growth*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2019. p. 447–463.

\_\_\_\_\_. **Unleashing a golden age after the financial collapse: Drawing lessons from history.** *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Elsevier, v. 6, p. 9–23, 2013.

SIVARAM, VARUN, NORRIS, TERYN. **The clean energy revolution: fighting climate change with innovation.** Disponível em: <https://go-gale.ez54.periodicos.capes.gov.br/>. . Acessado em dezembro de 2021.

SOLOMON, BARRY D., KRISHNAB, KARTHIK. **The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook.** Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301421512002054>. Acessado em dezembro de 2021.

VAN RENSSSEN, SONJA. **An energy Revolution**, 2012. Disponível em: *Nature Climate Change*. Acessado em dezembro de 2021.

## Capítulo 5 – Transição energética: cenários para o Brasil 2040

*“The world does not need to choose between the energy crisis and the climate crisis. We can solve both of them with the right investment”.*  
*Fatih Birol (IEA Executive Director), Davos, 2022.*

### Resumo

A construção de cenários para a transição energética para o Brasil 2040 tem por objetivo orientar os planejadores e tomadores de decisão sobre qual caminho seguir, tanto no setor público como privado. O desenvolvimento econômico e as inovações tecnológicas são as forças-motrizes da transição energética do século XXI. Entretanto, alguns fatores-chave são importantes para definir os rumos da transição no País. No Brasil, o preço dos combustíveis fósseis, o custo das renováveis, os aspectos regulatórios, políticas públicas e a pressão por sustentabilidade ambiental são fatores determinantes para as características e a velocidade das inovações na matriz energética. A partir da compreensão do comportamento das variáveis que compõem o fenômeno da transição, os cenários orientam estratégias para aproveitar as oportunidades e lidar com as ameaças para o setor energético, com impactos diretos no desenvolvimento do País, na sustentabilidade ambiental e na qualidade de vida de seus habitantes. A consulta aos especialistas indicou a transição gradual como o cenário mais provável para o Brasil.

Palavras-chave: transição energética; cenários prospectivos; planejamento;

### Abstract

The construction of scenarios for the energy transition for Brazil 2040 aims to guide planners and decision makers on which path to follow, both in the public and private sectors. The economic development and technological innovations are the driving forces of the energy transition of the twenty-first century. However, some key factors are important to define the directions of the transition in the country. In Brazil, the price of the fossil fuels, the cost of renewables, the regulatory aspects, the public policies and the pressure for environmental sustainability are determining factors for the characteristics and speed of changes in the energy matrix. From the understanding of the variables behavior that form the transition phenomenon, the scenarios guide strategies to take advantage of opportunities and deal with threats to the energy sector, with direct impacts on the country's development, in the environmental sustainability and in the life quality of its inhabitants. Consultation with specialists indicated the gradual transition as the safest scenario for Brazil.

**Keywords:** energy transition; prospective scenarios; planning;

### Introdução

A transição energética envolve inovações com diferentes características em cada país, sendo a tendência mais importante o aumento do uso de fontes renováveis na geração de energia. Com o pico do preço do barril do petróleo em 2008, as renováveis passaram a ser a



principal solução para garantir a geração descentralizada, favorecendo o acesso, a segurança energética e redução das emissões de gases de efeito estufa, com a expectativa de custos competitivos em relação aos combustíveis fósseis. Com os investimentos em novas tecnologias, regulação e políticas públicas, as energias renováveis, principalmente solar e eólica, apresentam custos cada vez menores, e ocupam mais espaço na matriz energética em muitos países. Entretanto, há incerteza a respeito dos custos dos novos projetos, e sobre o custo das novas energias que tragam previsibilidade e não estejam no grupo das energias intermitentes.

O Brasil possui uma matriz elétrica com participação de 81% de renováveis e a matriz energética com mais de 48% em renováveis em 2022, posição vantajosa em relação aos demais países no que se refere à segurança energética e matriz limpa, considerando a matriz global com quase 80% de combustíveis fósseis. Conforme foi demonstrado no capítulo 1, o perfil das emissões de CO<sub>2</sub> do setor de energia está diretamente relacionado ao uso de combustíveis fósseis, principalmente em transporte, indústria, geração de energia elétrica e produção de combustíveis, o que totalizou 18% das emissões do País em 2020.

Assim, a descarbonização do setor de energia no Brasil tem foco nos transportes e nos demais setores com queima de combustíveis. As mudanças na matriz elétrica no Brasil estão sendo impulsionadas pelo contexto de crise hídrica e mudanças climáticas em algumas de suas regiões onde estão localizadas as principais usinas hidrelétricas, e pelos altos custos dos novos projetos associados aos impactos socioambientais nas regiões afetadas por esses empreendimentos. Como resultado, há uma redução de investimentos em novos projetos de hidrelétricas.

Nesse contexto, o objetivo desse capítulo é apresentar o resultado da pesquisa orientada por método de construção de cenários para identificar os futuros possíveis para a matriz energética brasileira. Para este trabalho, o método descrito por Schwartz (2006) resultou adequado considerando a aplicação para o setor de energia, a viabilidade de consulta aos especialistas e por utilizar modelos qualitativos de análise.

O método da Global Business Network (GBN) é composto por oito etapas. Schwartz (2006) inicia o estudo dos cenários prospectivos com a identificação da questão principal. Nesta etapa, os especialistas definem o foco da análise, aquilo que é considerado estratégico para o desempenho exitoso um determinado período. Geralmente, envolvem futuros de longo prazo, em que há bastante incertezas a respeito das variáveis do sistema em análise. A questão principal deve buscar compreender o que os responsáveis pelas decisões estarão pensando em um futuro próximo e quais decisões a serem tomadas terão influência no longo prazo.

A segunda etapa consiste em identificar os fatores-chave que interessam às partes interessadas na questão principal. São selecionados os principais fatores que podem afetar as decisões a serem tomadas e as considerações que moldarão os resultados dessas decisões, que podem ser exitosas ou fracassadas. Com a visão do que interessa à questão principal, os especialistas identificam, na terceira etapa, as forças-motrizes. Essas forças originam-se, principalmente, nas categorias sociedade, tecnologia, economia, política e ambiente. São variáveis que, para um País, exigem muitas intervenções para construir o futuro desejado e são capazes de influenciar os fatores-chave identificados na etapa anterior. Daí a necessidade de reconhecê-las e compreender seus efeitos.

A quarta etapa é descobrir os elementos predeterminados e as incertezas críticas. Os elementos predeterminados configuram-se como tendências, ou seja, a ocorrência é certa. As incertezas críticas são variáveis que podem causar grande impacto nos cenários e trazem muitas incertezas quanto a sua realização e impacto sobre o futuro do sistema em análise. Com a seleção dessas variáveis de alta incerteza e alto impacto, o próximo passo é desenhar o enredo dos cenários. Nesta etapa, as variáveis são colocadas em eixos por intermédio dos quais os cenários vão se diferenciar. A lógica de um cenário será caracterizada pela sua posição na matriz formada pelas forças motrizes mais significativas.

Após a seleção das variáveis e a construção das possibilidades lógicas, os cenários passam a ser descritos de forma narrativa, uma “história contada” de como o mundo e o sistema em análise evolui até o horizonte projetado na formulação da questão principal. O exercício principal é analisar como está determinada decisão em cada cenário e identificar vulnerabilidades. Schwartz (2006) salienta que se uma decisão parece boa em apenas um cenário, é classificada como uma ação de alto risco.

A penúltima etapa envolve analisar as implicações dos cenários para as estratégias da organização. Nesta etapa, os cenários vão orientar qual caminho seguir ou deixar de seguir. Por último, Schwartz (2006) sugere selecionar indicadores e sinalizadores que indicam a concretização de um dos cenários descritos. É uma fase de monitoramento contínuo das variáveis em que o cenário passa a ser incorporado ao processo de planejamento. É importante saber, o mais cedo possível, qual dos cenários se encontra mais próximo do curso da história que está se desdobrando.

No Capítulo 4 – Forças Motrizes, Fatores-chave, Tendências e Incertezas, foi feita uma revisão bibliográfica sobre a terceira transição energética no século XXI. A partir das referências, foram identificadas as principais tendências e incertezas globais para a transição

energética. Foi elaborado um primeiro questionário para verificar as principais variáveis relevantes para o Brasil.

A pesquisa foi feita durante o Encontro Nacional dos Agentes do Setor Elétrico – ENASE 2019. Com a seleção dos que responderam que conheciam o tema da transição energética, 67 questionários foram considerados na amostra. O resultado do primeiro questionário apontou tendências e incertezas-críticas para o Brasil. Além disso, foram feitas entrevistas com o Ministro de Minas e Energia e servidores daquele Ministério.

Com a pandemia de Covid-19 e seus impactos na economia global, algumas incertezas-críticas passaram a ter maior relevância e importância para a velocidade da transição no Brasil. Além disso, em dezembro de 2020 o governo brasileiro publicou o Plano Nacional de Energia 2050 para orientar a política energética nas próximas três décadas e firmou, durante a COP 26 em Glasgow, o compromisso de alcançar emissões líquidas zero até 2050. Assim, um novo questionário foi elaborado com a visão 2040 para identificar as incertezas-críticas de maior importância e impacto para o Brasil. Desta feita, o questionário foi encaminhado aos especialistas, incluindo os do setor de óleo e gás, que gerou uma amostra de 40 questionários respondidos por conveniência.

Com amostra por conveniência (amostra não aleatória), os especialistas foram selecionados por integrarem grupo, empresa ou órgãos ligados ao setor de energia. A amostra abrange aqueles especialistas que foram mais acessíveis, colaborativos ou disponíveis para participar do processo, declararam que conhecem o tema da pesquisa “transição energética” e ofereceram suas contribuições respondendo o questionário on-line.

Após a construção dos cenários, os especialistas foram novamente consultados para avaliarem e validarem o comportamento das variáveis e seu impacto nos cenários descritos. Essa verificação foi feita em duas etapas com método Delphi. O método Delphi permite estruturar um processo de comunicação coletiva de modo que este seja efetivo, ao permitir a um grupo de indivíduos, como um todo, lidar com um problema complexo (Linstone & Turoff, 2002, p. 3), com o objetivo de encontrar consenso fundamentado entre um grupo de especialistas em relação a um determinado assunto ou problema (Facione, 1990, p. 54).

A primeira rodada permitiu que os especialistas avaliassem os enredos dos cenários. Com o retorno das respostas, foram feitos ajustes para buscar consenso entre os participantes da pesquisa e propor uma nova estrutura de enredo, avaliada pela segunda vez pelos respondentes, e que será apresentada mais à frente. Esta etapa não está prevista no método GBN, mas foi inserida nesta pesquisa para apresentar aos especialistas o resultado da pesquisa

e avaliar a percepção dos participantes sobre a velocidade da transição energética no Brasil 2040.

### **5.1 Identificação da questão principal**

Os cenários para a transição energética no Brasil, com uma visão para o ano 2040 são orientados pela questão: Qual caminho seguir no contexto da transição energética até 2040? Considerando as mudanças tecnológicas para uma economia de baixo carbono, o compromisso de emissões líquidas zero para 2050 e o crescimento econômico como objetivo perseguido por um País em desenvolvimento, aumenta a importância de fornecer aos empresários, investidores, governos, tomadores de decisão em geral e sociedade civil um caminho ou rota que podem ser percorridos até 2040.

Nesse caso, a velocidade da transição surge como um aspecto importante para as partes interessadas, considerando que investimentos, decisões e mudanças precisam ser orientados e conhecidos para que o Brasil mantenha ou amplie sua produtividade no caminho do desenvolvimento sustentável.

### **5.2 Os Fatores-chave**

Nos cenários energéticos, o preço do petróleo, o custo das renováveis, a regulação, as políticas públicas e as pressões por sustentabilidade ambiental são os fatores importantes para a transição no Brasil.

O alto preço do petróleo faz com que a demanda apresente tendência de queda e que alternativas com custo menor ganhem relevância no suprimento de energia. Por outro lado, o baixo preço do barril do petróleo aumenta a competitividade dessa *commodity* no mercado.

Em décadas recentes, com o alto custo de implantação dos sistemas de energia eólica e solar, os projetos ainda eram considerados pouco viáveis. Entretanto, com os ganhos de escala ocasionados pela melhoria tecnológica e queda nos custos, as energias solar e eólica passaram a ganhar competitividade no mercado nacional. Outro fator que favoreceu a competitividade foram os incentivos e a maturidade regulatória para estas duas últimas fontes.

Os marcos regulatórios possibilitaram segurança jurídica aos investidores e capacidade de inserção no mercado de energia. Além disso, políticas públicas de incentivo às renováveis, a partir das vantagens da geração distribuída e do incremento na oferta aumentaram a escala e as possibilidades de retorno aos investidores.

### 5.3 As forças-motrizes

O desenvolvimento econômico e a inovação tecnológica são as forças decisivas para a transição no Brasil. O desenvolvimento econômico é caracterizado pelo bem-estar geral da população, indicado pela elevação dos indicadores quantitativos da economia e qualitativos a respeito da qualidade de vida da população e adiciona o avanço tecnológico, caracterizado pela inovação em equipamentos, produtos, máquinas, utensílios que substituem ou melhoram determinada tecnologia anterior.

Um ambiente de baixo desenvolvimento econômico limita os investimentos em novas tecnologias e em projetos de desenvolvimento. Por outro lado, o crescimento econômico amplia a capacidade de investimentos em tecnologias e a diversificação da matriz energética. Esses investimentos são direcionados para pesquisa, desenvolvimento e inovação, em ambientes favoráveis, com regulação e políticas públicas. Por conseguinte, um baixo crescimento econômico limita a expansão em PD&I e vice-versa.

### 5.4 Tendências e incertezas críticas

Os especialistas indicaram como tendências a descarbonização da matriz energética, aumento da oferta de energias renováveis (não hídrica), eletrificação, uso da tecnologia de Captura e Armazenamento de Carbono, implementação do mercado livre de energia, ampliação do mercado de carbono, ganhos de eficiência energética, aumento da demanda por energia elétrica, criação de empregos verdes, ampliação da geração descentralizada, pressão social e pressão internacional por descarbonização, *smart grids* e governança global para transição energética e ampliação da cadeia de minerais e suprimentos.

Apesar da ocorrência dessas tendências, as mudanças em curso nos demais países ensejam incertezas ao Brasil. De acordo com entrevistas e consulta aos especialistas no escopo dessa pesquisa, foi possível identificar as principais incertezas-críticas para a transição energética no Brasil 2040, a partir das seguintes questões:

Até 2025, os países ricos mobilizarão 100 bilhões por ano, conforme o Acordo de Paris, para financiamento climático a países emergentes? Os biocombustíveis (etanol, biodiesel e bioquerosene) ganharão competitividade em relação aos combustíveis fósseis antes de 2040? O Brasil alcançará 10% em ganhos de eficiência no setor elétrico até 2040? O preço do barril de petróleo atingirá seu menor preço em 2040? (Visão a partir de 2022). Os enormes subsídios concedidos ao setor de combustíveis fósseis ao ano (no Brasil, US\$21 bi e no mundo, US\$ 5,2

tri em 2018) serão reduzidos até 2040? O governo brasileiro está comprometido com a transição energética de maneira a oferecer segurança para os investimentos até 2040? A Petrobras envidará alterações significativas no seu portfólio de negócios com foco em uma matriz energética renovável até 2040? Energias renováveis representarão 80% da matriz energética brasileira em 2040? (Em 2019, 46% da matriz era renovável). Os carros elétricos representarão 50% da frota nacional em 2040?

As respostas à essas questões indicaram incerteza-críticas nos seguintes temas: preço do barril do petróleo, capacidade de investimento em PD&I, demanda por biocombustíveis, mão de obra qualificada para empregos verdes, redução dos subsídios ao petróleo, comprometimento governamental, políticas públicas para transição, governança nacional para transição, mudanças no portfólio da Petrobras, aumento da regulação e aumento dos transportes elétricos.

Para identificar as principais tendências, partiu-se da revisão bibliográfica sobre transição energética e entrevistas com servidores do Ministério de Minas e Energia. O primeiro questionário aplicado permitiu identificar elementos predeterminados e aquelas apontadas como incertezas. Com a identificação das principais incertezas, foi possível elaborar o segundo questionário com a visão 2040 com amostra por conveniência de 40 respondentes que afirmaram que conhecem bem o assunto. As variáveis estão listadas no Quadro 10.

**Quadro 10 – Lista das principais variáveis indicadas na consulta aos especialistas**

Variáveis	Elementos pré-determinados ou incertezas
<b>Econômicas</b>	
Mudanças no portfólio da Petrobras	Incerteza
Preço do barril de petróleo	Incerteza
Expansão do consumo dos biocombustíveis	Incerteza
Aumento das renováveis (não hídrica)	Tendência
Ganhos de eficiência energética	Incerteza
Investimento em renováveis	Tendência
Disponibilidade de crédito	Incerteza
Mercado livre de energia	Tendência
Aumento da demanda por minerais estratégicos	Tendência
Mercado de carbono	Tendência
<b>Sociais</b>	
Redução das emissões GEE	Incerteza
Mão-de-obra qualificada	Incerteza

Expansão do acesso a energia elétrica	Tendência
Novos empregos "verdes"	Tendência
Empoderamento do consumidor	Tendência
Prossumidores	Tendência
Pressão social	Tendência
<b>Políticas</b>	
Políticas públicas para transição	Incerteza
Subsídios ao petróleo	Incerteza
Comprometimento do governo	Incerteza
Regulação	Incerteza
Governança ambiental	Incerteza
<b>Tecnológicas</b>	
Maturidade do setor energético	Tendência
Investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento	Incerteza
Investimentos em novas tecnologias	Incerteza
Smart grids	Tendência
Autosuficiência em P&D	Incerteza
Carros elétricos	Incerteza
Ônibus elétricos	Incerteza
Caminhões elétricos	Incerteza
Armazenamento de energia	Tendência
Captura e armazenamento de carbono	Tendência
Hidrogênio	Tendência
Energia nuclear	Tendência
Segurança energética	Tendência
Cadeias de suprimentos	Incerteza
<b>Internacionais</b>	
Financiamento climático	Incerteza
Transferência de tecnologia	Tendência
Governança global	Tendência
Pressão social	Tendência
Transição em países desenvolvidos	Tendência

Fonte: Elaboração própria.

Os especialistas apontaram como sendo as principais incertezas críticas aquelas com maior incerteza e maior impacto à questão principal, as seguintes variáveis: os aspectos de regulação, as políticas públicas, custo das energias renováveis e o preço do petróleo. É importante destacar que os especialistas apontaram como pouco importante a substituição dos combustíveis fósseis. O resultado sugere que o aumento da oferta de energia se concentra em

renováveis e que os combustíveis fósseis ainda continuam com papel relevante na matriz em 2040.

Em relação à velocidade da transição energética no Brasil, segundo os especialistas, 65% afirmaram que será gradual; para 12,5% será acelerada e para 20% a transição será lenta. Dos respondentes, 48,7% afirmaram que o Brasil conseguirá, até 2050, alcançar emissões líquidas zero, conforme compromisso declarado durante a COP26. Para 30,8%, dificilmente o Brasil atingirá essa meta e 20,5% consideram a questão incerta.

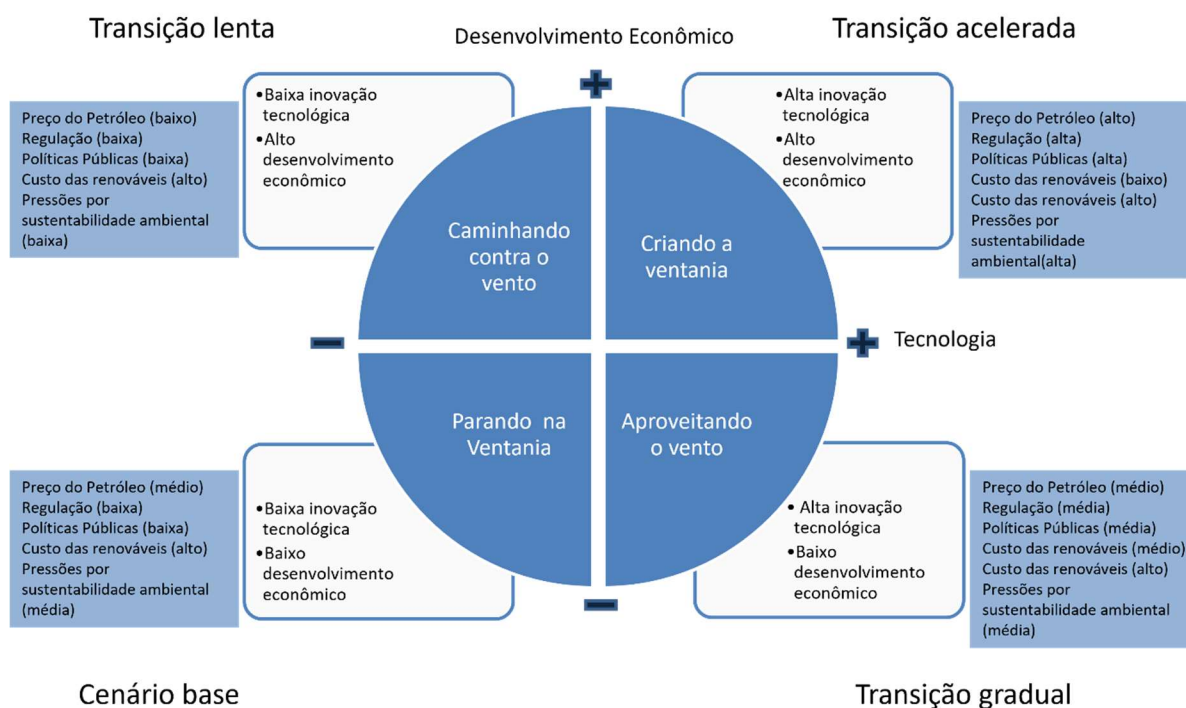
Para 40% dos especialistas, a pandemia de Covid-19 atrasou a transição energética no Brasil. Para 27,5%, a pandemia acelerou a transição e 27,5% não tem opinião a respeito. Para 45%, o atual conflito Rússia x Ucrânia acelera a transição energética no Brasil; 27,5% julgam que é uma incerteza.

## **5.5 Enredos dos cenários**

Nesta etapa, as variáveis são colocadas em matriz que permite visualizar aquelas combinações interessantes aos tomadores de decisão. Com essas variáveis, os enredos foram construídos para orientar quatro cenários mais importantes para a transição no Brasil, conforme o esquema:



**Figura 6 – Enredos e Cenários para a Transição Energética no Brasil 2040**



Fonte: Elaboração própria.

Os enredos consideram cenários de alto ou baixo desenvolvimento econômico e inovação tecnológica. Em cada hipótese, os fatores-chave apresentam variações compatíveis ao cenário em análise. Assim, quatro cenários descrevem uma transição acelerada, gradual, *business as usual* ou lenta.

O cenário de transição acelerada foi denominado *Criando a ventania*, considerando a capacidade do País de promover o processo de inovação em alta velocidade e a substituição de algumas tecnologias existentes em energia baseadas em fósseis. Nesse cenário, o Brasil encontra-se em um contexto de alta inovação tecnológica e alto desenvolvimento econômico.

No segundo cenário, *Aproveitando o vento*, a transição passa a ser dependente das inovações tecnológicas e investimentos de outros países e do financiamento climático. Em um ambiente de baixo desenvolvimento econômico, o País passa a ser um agente passivo como fornecedor de insumos ao setor de energia, o que define uma transição gradual.

Em um contexto *business as usual*, termo utilizado para denominar cenários em que as variáveis atuais permanecem até 2040, o cenário seguinte, *Parando na ventania*, descreve poucas influências capazes de promover mudanças significativas na matriz energética, e o Brasil estaciona em um ambiente de baixo desenvolvimento econômico e baixa inovação tecnológica.

E, por fim, no último cenário, *Caminhando contra o vento*, apesar do alto desenvolvimento econômico, impulsionado pela exploração massiva de *commodities*, o País prioriza aproveitar ao máximo suas reservas de combustíveis fósseis e direcionar os investimentos para outros setores, sem considerar as inovações tecnológicas para o setor de energia. O cenário descreve um contexto em que a transição se desenvolve em uma trajetória lenta, com fatores que não favorecem a inovação na matriz energética.

## 5.6 Cenários

Os cenários passam a ser descritos de forma narrativa, uma “história contada” de como o mundo e o sistema em análise evolui até 2040 no Brasil para buscar responder: Quais são os caminhos possíveis para o Brasil no âmbito da transição energética até 2040?

### 5.6.1 *Criando a ventania*

*O Cenário Criando a Ventania descreve uma trajetória de alto desenvolvimento econômico e intensas inovações tecnológicas na matriz energética brasileira.*

O Brasil, em um ambiente de alto desenvolvimento econômico e tecnológico, acompanhou a transição energética dos países desenvolvidos com rápidas mudanças para uma economia de baixo carbono impulsionada pelo financiamento climático.

Os altos preços do barril de petróleo, o baixo custo médio das energias renováveis, a estratégia de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, e de reduzir as emissões de gases de efeito estufa do setor de energia por meio de políticas públicas e regulamentações, somados ao aumento das pressões por sustentabilidade ambiental na sociedade e partes interessadas do setor, foram os fatores-chave que impulsionaram uma transição acelerada no Brasil.

A partir do comprometimento do governo federal, dos estados e dos municípios foram implementadas políticas públicas que favoreceram a transição de baixo carbono, reduzindo subsídios aos combustíveis fósseis e aumentando a geração de valor em substituição aos *royalties* do petróleo. Com a sinalização positiva do governo e a maturidade dos aspectos regulatórios, houve ampla disponibilidade de crédito por parte de investidores em *startups* e para institutos de pesquisa, desenvolvimento e inovação.

O mercado de carbono passou a desempenhar papel chave no caminho de emissões zero líquido para a matriz energética brasileira. Ações de governança foram fundamentais para alcançar a melhor alocação dos recursos que favoreceram os investimentos em pesquisa,

desenvolvimento e inovação em fontes de energia limpa e renovável. Para os setores difíceis de descarbonizar, as tecnologias de captura e armazenamento de carbono foram amplamente utilizadas para reduzir as emissões nacionais.

Os biocombustíveis tiveram um importante papel em reduzir as emissões em curto período como importantes combustíveis de transição. A eletrificação acelerada impediu a ampliação da cadeia, ficando restrita a nichos difíceis de eletrificar. Além disso, a alta demanda global por alimentos torna incerta a manutenção da participação na matriz energética a partir de 2040.

Os expressivos investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento resultaram em novas tecnologias nacionais competitivas, com uma robusta cadeia de suprimentos para as renováveis no País. Além de atender seu mercado interno com minerais estratégicos para a transição, o Brasil tornou-se o principal exportador de lítio, níquel, cobalto, manganês e grafite para baterias e terras raras para turbinas eólicas e motores de veículos elétricos. Com exploração e manejo sustentáveis, o País conseguiu auferir o preço máximo para estas *commodities* no mercado internacional. As baterias ganharam escalabilidade nos últimos anos e foram o esteio da ampliação das renováveis intermitentes e da geração distribuída.

Internamente, a geração distribuída foi consideravelmente ampliada, com redes que atendem cidades inteligentes por meio de *smart grids*. As cidades inteligentes passaram a ser movimentadas por carros, caminhões e ônibus elétricos que contam com ampla infraestrutura de recarga. O mercado livre de energia permitiu alta competitividade dos preços e a possibilidade empoderamento do consumidor com suas escolhas por energia limpa e como produtores de energia.

O Brasil conseguiu diversificar sua matriz energética, como foi previsto no Plano Nacional de Energia 2050, principalmente com energia solar, eólica e nuclear, utilizando as hidrelétricas como grandes baterias do Sistema Interligado Nacional. O hidrogênio passou a ser um importante combustível na matriz energética. Algumas térmicas existentes ainda utilizam CCUS (*Carbon Capture, Utilization, and Storage* - CCUS). Projetos de energia geotérmica e maremotriz começaram a ganhar participação no mercado.

O Brasil garantiu o acesso à energia a 100% da sua população bem como a segurança energética em todas as regiões do País. A população teve um importante papel em participar das reduções da emissão de Gases de Efeito Estufa, a partir da escolha por produtos mais eficientes e com mudanças de hábitos que favoreceram a economia de energia. As comunidades de baixa renda foram beneficiadas pela geração distribuída com a redução da conta de energia e venda do excedente produzido para a rede das distribuidoras.

Com os investimentos em qualificação da mão-de-obra foi possível ampliar a população ocupada em “empregos verdes”. A alta demanda por novas tecnologias alimentadas por energia de baixo custo e renovável aqueceu o parque industrial nacional, reduziu os custos para o setor de serviços e colocou o Brasil como exportador de suprimentos e equipamentos de alto valor agregado.

A Petrobras passou a ser uma importante companhia de energia, destacando-se pela exploração de petróleo e gás com CCUS, eólica *offshore*, maremotriz, biocombustíveis e hidrogênio. Com a variação do portfólio, aliada ao alto preço do barril de petróleo e alta dependência dos setores difíceis de descarbonizar, a Petrobras manteve lucros altos. Em 2040, as energias renováveis representam 80% da matriz energética brasileira, e os carros elétricos representam 50% da frota nacional.

### **5.6.2 Aproveitando o Vento**

*O Cenário, Aproveitando o Vento, descreve uma trajetória de muitas inovações tecnológicas na matriz energética brasileira em um ambiente de baixo desenvolvimento econômico.*

O Brasil, em um ambiente de baixo desenvolvimento econômico e alta dependência tecnológica dos países desenvolvidos, não acompanhou a rápida velocidade da transição energética dos países desenvolvidos e obteve mudanças graduais para uma economia de baixo carbono. O financiamento climático foi utilizado para as mudanças tecnológicas na matriz energética.

Os preços medianos do barril de petróleo, o custo médio das energias renováveis, a ausência de estratégia de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e a incapacidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa do setor de energia por meio de políticas públicas e regulamentação, somados aos poucos avanços na questão da sustentabilidade ambiental na sociedade e partes interessadas do setor, foram os fatores-chave que configuraram uma transição gradual no Brasil.

Com o baixo comprometimento do governo federal, dos estados e dos municípios não foram implementadas políticas públicas que favoreceriam a transição de baixo carbono, os subsídios aos combustíveis fósseis foram mantidos e os *royalties* do petróleo continuaram a ser fontes de receitas para um Estado altamente endividado. Com a tímida sinalização positiva do

governo e a lentidão para formular dos aspectos regulatórios, houve pouca disponibilidade de crédito por parte de investidores em *startups* e para institutos de pesquisa e desenvolvimento.

O mercado de carbono enfraquecido não desempenhou papel chave no caminho emissões zero líquido para a matriz energética brasileira. A baixa governança atrapalhou a melhor alocação dos recursos que favoreceriam os investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação em fontes de energia limpa e renovável. Para os setores difíceis de descarbonizar, as tecnologias de captura e armazenamento de carbono foram altamente utilizadas para reduzir as emissões nacionais.

Os biocombustíveis tiveram um importante papel em reduzir as emissões no período como importantes combustíveis de transição. A eletrificação gradual favoreceu ampliação da cadeia. Entretanto, a alta demanda global por alimentos torna incerta a manutenção da participação na matriz energética a partir de 2040.

Com financiamento dos países desenvolvidos, o Brasil acessou novas tecnologias para energias renováveis a preços competitivos. Além de atender seu mercado interno com minerais estratégicos para a transição, o Brasil se tornou exportador de lítio, níquel, cobalto, manganês e grafite para baterias e terras raras para turbinas eólicas e motores de veículos elétricos, mas com dificuldades de exploração e manejo sustentável, o País não conseguiu auferir o preço máximo para estas *commodities* no mercado internacional. As baterias ganharam escalabilidade nos últimos anos e favoreceram ampliação das renováveis intermitentes e da geração distribuída.

Internamente, a geração distribuída foi ampliada, com redes que atendem cidades inteligentes por meio de *smart grids* em algumas cidades brasileiras. As cidades inteligentes ainda são um conceito em construção, com o planejamento para serem movimentadas por carros, caminhões e ônibus elétricos com ampla infraestrutura de recarga. O mercado livre de energia ainda engatinha no País e atrasou a alta competitividade dos preços e a possibilidade empoderamento do consumidor com suas escolhas por energia limpa e como produtores de energia.

O Brasil pouco diversificou sua matriz, diferente do preconizado no Plano Nacional de Energia 2050, principalmente com energia solar, eólica e nuclear, utilizando as hidrelétricas como grandes baterias do Sistema Interligado Nacional. O hidrogênio passou a ser um importante combustível para o futuro. Algumas térmicas existentes ainda utilizam CCUS (*Carbon Capture, Utilization, and Storage* - CCUS) e projetos de energia geotérmica e maremotriz começaram a ganhar participação no mercado.

O Brasil garantiu acesso à energia a 100% da sua população, bem como a segurança energética em todas as regiões do País. A população pouco participou em contribuir com as reduções da emissão de Gases de Efeito Estufa, a partir da escolha por produtos mais eficientes e com mudanças de hábitos que favoreceram a economia de energia. As comunidades de baixa renda foram pontualmente beneficiadas pela geração distribuída com a redução da conta de energia e venda do excedente produzido para a rede de distribuição.

Com os baixos investimentos em qualificação da mão-de-obra foi discreta a ampliação população ocupada em “empregos verdes”. A demanda por novas tecnologias alimentadas por energia de baixo custo e renovável desaqueceu o parque industrial nacional, aumentou os custos para o setor de serviços e colocou o Brasil como importador de suprimentos e equipamentos de alto valor agregado.

A Petrobras continuou a ser uma importante petroleira, destacando-se mundialmente pela exploração de petróleo e gás. Com preços medianos do barril de petróleo e alta dependência dos combustíveis fósseis, a Petrobras manteve lucros médios. Em 2040, as energias renováveis representam menos de 80% da matriz energética brasileira em 2040 (Em 2019, 46% da matriz era renovável), e os carros elétricos representam menos de 50% da frota nacional.

### **5.6.3 *Parando na Ventania***

*O Cenário, Parando na Ventania, descreve uma trajetória de poucas inovações tecnológicas na matriz energética brasileira em ambiente de baixo desenvolvimento econômico.*

O Brasil, em um ambiente de baixo desenvolvimento econômico e tecnológico, não acompanhou a transição energética dos países desenvolvidos com mudanças para uma economia de baixo carbono. Os países desenvolvidos não fizeram transferência integral dos recursos para o financiamento climático.

Os preços médios do barril de petróleo, a pouca redução nos custos médios das energias renováveis, inflacionada pelo custo dos minerais críticos, a ausência de estratégia de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e a incapacidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa do setor de energia, por meio de políticas públicas e regulamentação num ambiente de baixa sustentabilidade ambiental, foram os fatores-chave que configuraram uma transição *Business as usual* no Brasil.

Com o baixo comprometimento do governo federal, dos estados e dos municípios, não foram implementadas políticas públicas que favoreceriam a transição de baixo carbono, os subsídios aos combustíveis fósseis foram mantidos e os *royalties* do petróleo continuaram a ser fontes importantes de receitas. Com a tímida sinalização positiva do governo e a imaturidade dos aspectos regulatórios, houve pouca disponibilidade de crédito por parte de investidores em *startups* e para institutos de pesquisa e desenvolvimento.

O mercado de carbono enfraquecido não desempenhou papel relevante no caminho emissões zero líquido para a matriz energética brasileira. A baixa governança atrapalhou a melhor alocação dos recursos que favoreceriam os investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação em fontes de energia limpa e renovável. Para os setores difíceis de descarbonizar, as tecnologias de captura e armazenamento de carbono foram pouco utilizadas para reduzir as emissões nacionais.

Os biocombustíveis tiveram um importante papel em reduzir as emissões no período como importantes combustíveis de transição. A eletrificação lenta favoreceu a ampliação da cadeia. Entretanto, a alta demanda global por alimentos torna incerta a manutenção da participação na matriz energética a partir de 2040.

A redução dos investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento desincentivaram novas tecnologias nacionais competitivas, com uma cadeia de suprimentos para as renováveis no País. O Brasil tornou-se exportador de lítio, níquel, cobalto, manganês e grafite para baterias e terras raras para turbinas eólicas e motores de veículos elétricos, mas com dificuldades de exploração e manejo sustentável, o País não conseguiu auferir o preço máximo para estas *commodities* no mercado internacional. As baterias ganharam pouca escalabilidade nos últimos anos e dificultaram a ampliação das renováveis intermitentes e da geração distribuída.

Internamente, a geração distribuída foi ampliada, com redes que atendem cidades inteligentes por meio de *smart grids* em algumas cidades brasileiras. As cidades inteligentes ainda são um conceito em construção, com o planejamento para serem movimentadas por carros, caminhões e ônibus elétricos com ampla infraestrutura de recarga. O mercado livre de energia ainda engatinha no País e retardou a alta competitividade dos preços e a possibilidade empoderamento do consumidor com suas escolhas por energia limpa e como produtores de energia.

O Brasil pouco diversificou sua matriz, diferente do previsto no Plano Nacional de Energia 2050, principalmente com energia solar, eólica e nuclear, utilizando as hidrelétricas como grandes baterias do Sistema Interligado Nacional. O hidrogênio passou a ser um importante combustível para o futuro. Algumas térmicas existentes ainda utilizam CCUS

(*Carbon Capture, Utilization, and Storage - CCUS*) e projetos de energia geotérmica e maremotriz começaram a ganhar participação no mercado.

O Brasil ainda precisa garantir acesso à energia a 100% da sua população bem como a segurança energética em todas as regiões do País. A população pouco participou em contribuir com as reduções da emissão de Gases de Efeito Estufa, a partir da escolha por produtos mais eficientes e com mudanças de hábitos que favoreceram a economia de energia. As comunidades de baixa renda foram pontualmente beneficiadas pela geração distribuída com a redução da conta de energia e venda do excedente produzido para a rede de energia.

Com os baixos investimentos em qualificação da mão-de-obra, foi discreta a ampliação população ocupada em “empregos verdes”. A baixa demanda por novas tecnologias alimentadas por energia de baixo custo e renovável desaqueceu o parque industrial nacional, aumentou os custos para o setor de serviços e colocou o Brasil como importador de suprimentos e equipamentos de alto valor agregado.

A Petrobras continuou a ser uma importante petroleira, destacando-se pela exploração de petróleo e gás. Com os preços médios do barril de petróleo e alta dependência interna dos combustíveis fósseis, a petrobras manteve lucros medianos. Em 2040, as energias renováveis representam menos de 80% da matriz energética brasileira em 2040 (Em 2019, 46% da matriz era renovável), e os carros elétricos representam menos de 50% da frota nacional.

#### **5.6.4 Caminhando contra o Vento**

*O Cenário, Caminhando contra o vento, descreve uma trajetória de poucas inovações tecnológicas na matriz energética brasileira em ambiente de alto desenvolvimento econômico.*

O Brasil, em um ambiente de alto desenvolvimento econômico e baixa inovação tecnológica, não acompanhou a transição energética dos países desenvolvidos e obteve mudanças lentas para uma economia de baixo carbono. Os países desenvolvidos não conseguiram cumprir o compromisso para o financiamento climático nos países em desenvolvimento.

Os baixos preços do barril de petróleo, o alto custo das energias renováveis, a ausência de estratégia de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e a incapacidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa do setor de energia por meio de políticas públicas e regulamentação em um ambiente de pouca pressão por sustentabilidade ambiental, foram os fatores-chave que configuraram uma transição lenta no Brasil.



Com o baixo comprometimento do governo federal, dos estados e dos municípios não foram implementadas políticas públicas que favoreceriam a transição de baixo carbono, os subsídios aos combustíveis fósseis foram mantidos e os *royalties* do petróleo continuaram a ser fontes de receitas para um Estado que ampliou seu crescimento econômico como grande exportador de *commodities* agropecuárias, minerais e florestais. Com a tímida sinalização positiva do governo e a lentidão para formular dos aspectos regulatórios, houve pouca disponibilidade de crédito por parte de investidores em *startups* e para institutos de pesquisa e desenvolvimento no setor de energia.

O mercado de carbono enfraquecido não desempenhou papel chave no caminho emissões zero líquido para a matriz energética brasileira. A baixa governança atrapalhou a melhor alocação dos recursos que favoreceriam os investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação em fontes de energia limpa e renovável. Para os setores difíceis de descarbonizar, as tecnologias de captura e armazenamento de carbono foram utilizadas para reduzir as emissões nacionais.

Os biocombustíveis tiveram um importante papel em reduzir as emissões no período como importantes combustíveis de transição. A eletrificação lenta favoreceu a ampliação da cadeia. Entretanto, a alta demanda global por alimentos torna incerta a manutenção da participação na matriz energética a partir de 2040.

A redução dos investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento desincentivaram novas tecnologias nacionais competitivas, com uma cadeia de suprimentos para as renováveis no País. O Brasil tornou-se grande exportador de lítio, níquel, cobalto, manganês e grafite para baterias e terras raras para turbinas eólicas e motores de veículos elétricos, mas com exploração e manejo sustentável por iniciativa do setor privado, o País conseguiu auferir o preço máximo para estas *commodities* no mercado internacional. As baterias ganharam pouca escalabilidade nos últimos anos e dificultaram a ampliação das renováveis intermitentes e da geração distribuída.

A geração distribuída foi discretamente ampliada, com redes que atendem cidades inteligentes por meio de *smart grids* em algumas cidades brasileiras. As cidades inteligentes ainda são um conceito em construção, com o planejamento para serem movimentadas por carros, caminhões e ônibus elétricos com ampla infraestrutura de recarga. O mercado livre de energia ainda engatinha no País e retardou a alta competitividade dos preços e a possibilidade empoderamento do consumidor com suas escolhas por energia limpa e como produtores de energia.

O Brasil pouco diversificou sua matriz, diferente do previsto no Plano Nacional de Energia 2050, principalmente com energia solar, eólica e nuclear, utilizando as hidrelétricas como grandes baterias do Sistema Interligado Nacional. O hidrogênio passou a ser um importante combustível para o futuro. Algumas térmicas existentes não utilizam CCUS (*Carbon Capture, Utilization, and Storage* - CCUS) e projetos de energia geotérmica e maremotriz não ganharam participação no mercado.

O Brasil garantiu acesso à energia a 100% da sua população bem como a segurança energética em todas as regiões do País. A população pouco participou em contribuir com as reduções da emissão de Gases de Efeito Estufa a partir da escolha por produtos mais eficientes e com mudanças de hábitos que favoreceram a economia de energia. Algumas comunidades de baixa renda foram beneficiadas, por meio de financiamento externo, pela geração distribuída com a redução da conta de energia e venda do excedente produzido para a rede de energia.

Com os baixos investimentos em qualificação da mão-de-obra foi discreta a ampliação população ocupada em “empregos verdes”. A demanda por novas tecnologias alimentadas por energia de baixo custo e renovável desaqueceu o parque industrial nacional, aumentou os custos para o setor de serviços e colocou o Brasil como importador de suprimentos e equipamentos de alto valor agregado.

A Petrobras continuou a ser uma importante petroleira, destacando-se pela exploração de petróleo e gás. Com o baixo preço do barril de petróleo e alta dependência dos combustíveis fósseis, a Petrobras manteve lucros altos.

Em 2040, as energias renováveis representam menos de 80% da matriz energética brasileira em 2040 (Em 2019, 46% da matriz era renovável), e os carros elétricos representam menos de 50% da frota nacional.

## **5.7 Validação dos cenários**

A validação dos cenários tem por objetivo avaliar o comportamento das variáveis em um determinado cenário. Para tanto, foi enviado um questionário a especialistas, com pesquisa por conveniência, da qual foram obtidas 14 (quatorze) respostas. Esse questionário contém quatro cenários possíveis que envolvem as principais incertezas-críticas relacionadas à transição no Brasil. Esta etapa não está prevista no método GBN, mas foi inserida nesta pesquisa para apresentar aos especialistas o resultado da pesquisa e avaliar a percepção dos participantes sobre a velocidade da transição energética no Brasil 2040.

Em um cenário de alto desenvolvimento econômico e alta inovação tecnológica em 2040, uma transição energética RÁPIDA envolve alto preço do barril de petróleo (por volta de US\$ 150), alta regulamentação e políticas públicas de incentivo a descarbonização, aumento das pressões por sustentabilidade ambiental e baixo custo das energias renováveis (solar e eólica, principalmente) em relação a 2022.

Em um cenário de baixo desenvolvimento econômico e alta inovação tecnológica em 2040, uma transição energética GRADUAL envolve preço médio do barril de petróleo (por volta de US\$ 80), avanços medianos na regulamentação e nas políticas públicas de incentivo à descarbonização, aumento das pressões por sustentabilidade ambiental e importante redução dos custos das energias renováveis (solar, eólica e biocombustíveis, principalmente) em relação a 2022.

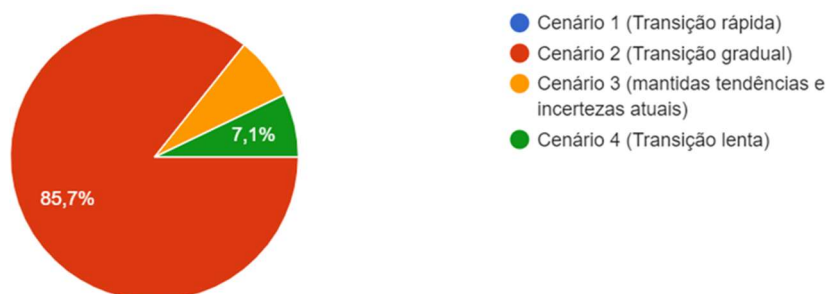
Em um cenário de baixo desenvolvimento econômico e baixa inovação tecnológica em 2040, uma transição energética mantendo tendências e incertezas atuais (*Business as usual*) envolve preço médio do barril de petróleo (por volta de US\$ 80), avanços medianos na regulamentação para descarbonização e políticas públicas de incentivo coexistindo com outras que atrasam a descarbonização do setor energético, manutenção das pressões por sustentabilidade ambiental e discreta redução dos custos das energias renováveis (solar e eólica, principalmente) em relação a 2022.

Em um cenário de alto desenvolvimento econômico e baixa inovação tecnológica em 2040, uma transição energética LENTA envolve preço baixo do barril de petróleo (por volta de US\$ 50), poucos avanços na regulamentação para descarbonização, poucas políticas públicas de incentivo, retrocessos das pressões por sustentabilidade ambiental e aumento dos custos das energias renováveis (solar e eólica, principalmente) em relação a 2022.

### Gráfico 13 –Transição energética no Brasil 2040

Dentre os 4 cenários apresentados, indique o mais provável para a transição energética no Brasil 2040:

14 respostas



Fonte: Elaboração própria.

A maioria dos especialistas consultados indicou uma transição gradual para o Brasil no horizonte 2040. Em um cenário de baixo desenvolvimento econômico e alta inovação tecnológica em 2040, uma transição energética gradual envolve preço médio do barril de petróleo (por volta de US\$ 80), avanços medianos na regulamentação e nas políticas públicas de incentivo à descarbonização, aumento das pressões por sustentabilidade ambiental e importante redução dos custos das energias renováveis (solar, eólica e biocombustíveis principalmente) em relação a 2022.

## 5.8 Estratégias para o Brasil

A penúltima etapa proposta por Schwartz (2006) envolve analisar as implicações dos cenários para as estratégias da organização, do país ou para tomadores de decisão. Nesta etapa, os cenários vão orientar qual caminho seguir ou deixar de seguir. A análise é dual, para ambiente externo, com suas oportunidades e ameaças, ou interno, com suas forças e fraquezas.

Em um contexto de transição acelerada, o Brasil passa a ser um importante *player* em geração de energia. As oportunidades e forças surgem como fornecedor de minerais estratégicos, fornecedor de suprimentos e tecnologias, amplia sua capacidade para empregos verdes, aumenta sua oferta de energia, entra na rota do seu compromisso de emissões líquidas zero até 2050. Avaliando as fraquezas e ameaças, uma transição acelerada requer medidas para substituir os subsídios aos combustíveis fósseis e gerenciar os impactos internos da descarbonização, como no caso da Petrobras como importante contribuinte para as receitas do governo brasileiro.

Em uma transição gradual, os ganhos de oportunidade também são graduais. Se outros países implementarem mudanças mais rápidas, o Brasil continua como fornecedor de minerais estratégicos, mas permanece dependente de importação de suprimentos e tecnologia. A janela de oportunidade para os biocombustíveis é ampliada em um cenário de eletrificação lenta e o setor de óleo e gás amplia sua possibilidade temporal para produção e consumo. A transição gradual precisa estar ajustada ao compromisso de emissões líquidas zero em 2050, com regulação e políticas públicas que de fato contribuam para esta meta.

No cenário *business as usual*, o País continua com uma matriz composta por combustíveis fósseis e como exportador dessa *commodity*, dependente das oscilações do mercado internacional. As pressões internacionais podem se intensificar em relação ao compromisso de emissões líquidas zero.

Em uma transição lenta, o País fica para trás na transição e apresenta problemas de oferta de energia. O parque industrial fica defasado em relação aos países desenvolvidos e com grande dependência externa por suprimentos e tecnologias. As pressões internacionais se intensificam em relação ao compromisso de emissões líquidas zero.

## **5.9 Monitoramento dos cenários**

Schwartz (2206) sugere selecionar indicadores e sinalizadores que indicam a concretização de um dos cenários descritos. É uma fase de monitoramento contínuo das variáveis em que o cenário passa a ser incorporado ao processo de planejamento.

Nesse sentido, o monitoramento dos indicadores de desenvolvimento econômico e inovação tecnológica são base para análise da transição no Brasil. Outros indicadores referem-se aos fatores-chave do preço do petróleo, o custo das renováveis, a regulação, as políticas públicas e as pressões por sustentabilidade ambiental. Para um monitoramento detalhado, incluir as tendências e o comportamento das demais incertezas pode oferecer uma robusta visão do desempenho do setor energético nacional.

## **Conclusão**

Quatro cenários descrevem hipóteses possíveis para o País e oferecem aos planejadores e tomadores de decisão a possibilidade de análise das oportunidades e das ameaças inerentes às mudanças na matriz energética brasileira. A análise dos quatro cenários apresentados contribui para a avaliação das melhores decisões por parte do governo brasileiro, empresas e

partes interessadas do setor energético, a fim de colocar o País em condições de aproveitar as vantagens da transição em benefício do desenvolvimento nacional.

De acordo com a visão dos especialistas consultados, a transição energética no Brasil assumirá um ritmo gradual, com uma trajetória de muitas mudanças tecnológicas na matriz energética brasileira em um ambiente de baixo desenvolvimento econômico. Em um ambiente de baixo desenvolvimento econômico e alta dependência tecnológica importada, o País não acompanhará na mesma velocidade a transição energética dos países desenvolvidos e obterá mudanças graduais para uma economia de baixo carbono.

Essa visão parece ser coerente com o aproveitamento do potencial dos biocombustíveis e combustíveis fósseis disponíveis, ao passo que o País incrementa sua matriz energética com energias renováveis, principalmente nos combustíveis para transportes e para geração de energia.

## Referências

FACIONE, P. A. **Critical thinking: a statement of expert consensus for purposes of educational assessment and instruction**. Research findings and recommendations (Report). Newark: American Philosophical Association, 1990.

LINSTONE, H. A., & TUROFF, M. (2002). **The Delphi method: Techniques and applications**. Addison Wesley Newark, NJ: New Jersey Institute of Technology. Disponível em: <https://web.njit.edu/~turoff/pubs/delphibook/index.html>.  
<https://web.njit.edu/~turoff/pubs/delp>. Acessado em outubro de 2022.

RIFKIN, J. **The Third Industrial Revolution**. Palgrave Macmillan. 304 págs, 2012.

SMIL, Vaclav. **Energy and civilization: a History**. Cambridge, MA: The MIT Press, 2017.

\_\_\_\_\_. **Energy Transitions: Global and National Perspectives**. Editora Praeger, 2016.

SACHS, Ignacy. **A revolução energética do século XXI**. Estudos Avançados. 21 (59): 21–38. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142007000100004>.

SCHWARTZ, P. **Scenario Planning: Managing for the future**. England: Wet Sussex, 1998.

\_\_\_\_\_. **A arte da visão a longo prazo. Planejando um futuro em um mundo de incertezas**. 4ª ed. – Rio de Janeiro: Best Seller, 2006.

## CONCLUSÃO GERAL

1. Na visão dos especialistas, a transição energética no Brasil será gradual e de longo prazo. Isso significa que, até 2040, algumas inovações ocorrerão na matriz energética brasileira, sem, entretanto, adotar todas as medidas do cenário REMap previsto no *Roadmap 2050* (IEA, 2020) que prevê por volta de 80% de energias renováveis na matriz. As dificuldades e resistências são muitas e de peso, considerando o papel do óleo e gás para as receitas do Brasil. As pressões internacionais maiores serão sobre os meios de transporte, onde, por acaso, o Brasil já tem uma experiência inovadora com a utilização do etanol.

2. A possibilidade de descarbonizar a matriz energética estará concentrada principalmente nas indústrias, transportes e na geração de energia, sobretudo no uso de combustíveis fósseis. Os cenários desenhados aqui preveem quatro hipóteses: transição *business as usual*, lenta, gradual e rápida, dependendo principalmente da dinâmica econômica e inovações tecnológicas. Para cada cenário se realizar será necessário, essencialmente, a combinação destas duas forças motrizes e mais cinco fatores chaves: preço médio do barril de petróleo, custos das energias renováveis, regulamentação, adoção de políticas públicas favoráveis e pressão por sustentabilidade ambiental.

3. Em um cenário de alto desenvolvimento econômico e alta inovação tecnológica em 2040, uma transição energética rápida envolve alto preço do barril de petróleo (por volta de US\$ 150), alta regulamentação e políticas públicas de incentivo a descarbonização, aumento das pressões por sustentabilidade ambiental e baixo custo das energias renováveis (solar e eólica, principalmente) em relação a 2022. Considera-se que em um contexto de transição acelerada, o Brasil passa a ser um importante *player* em geração de energia. As oportunidades e forças surgem como fornecedor de minerais críticos, fornecedor de suprimentos e tecnologias, amplia sua capacidade para empregos verdes, aumenta sua oferta de energia, entra na rota do seu compromisso de emissões líquidas zero até 2050. Avaliando as fraquezas e ameaças, uma transição acelerada requer medidas para substituir os subsídios aos combustíveis fósseis e gerenciar os impactos internos da descarbonização, como no caso da Petrobras como importante contribuinte para as receitas do governo brasileiro.

4. Em um cenário de baixo desenvolvimento econômico e alta inovação tecnológica em 2040, uma transição energética gradual envolve preço médio do barril de petróleo (por volta de US\$ 80), avanços medianos na regulamentação e nas políticas públicas de incentivo à descarbonização, manutenção das pressões por sustentabilidade ambiental e importante redução dos custos das energias renováveis (solar, eólica e biocombustíveis,



principalmente) em relação a 2022. Em uma transição gradual, os ganhos de oportunidade também são graduais. Se outros países implementarem mudanças mais rápidas, o Brasil continua como fornecedor de minerais críticos, mas permanece dependente de importação de suprimentos e tecnologia. A transição gradual precisa estar ajustada ao compromisso de emissões líquidas zero em 2050, com regulação e políticas públicas que de fato contribuam para esta meta.

5. Em um cenário de baixo desenvolvimento econômico e baixa inovação tecnológica em 2040, uma transição energética mantendo as tendências e incertezas atuais (*Business as usual*) envolve preço médio do barril de petróleo (por volta de US\$ 80), poucos avanços na regulamentação para descarbonização e políticas públicas de incentivo coexistindo com outras que atrasam a descarbonização do setor energético, manutenção das pressões por sustentabilidade ambiental e discreta redução dos custos das energias renováveis (solar, eólica e biocombustíveis, principalmente) em relação a 2022. No cenário Parando na ventania, o País continua com uma matriz composta por combustíveis fósseis e como exportador dessa *commodity*, dependente das oscilações do mercado internacional. As pressões internacionais podem se intensificar em relação ao compromisso de emissões líquidas zero.

6. Em um cenário de alto desenvolvimento econômico e baixa inovação tecnológica em 2040, uma transição energética lenta no Brasil envolve preço baixo do barril de petróleo (por volta de US\$ 50), poucos avanços na regulamentação para descarbonização, poucas políticas públicas de incentivo, retrocessos das pressões por sustentabilidade ambiental e altos custos das energias renováveis (solar, eólica e biocombustíveis principalmente) em relação a 2022. Em uma transição lenta, o País fica para trás na transição e apresenta problemas de oferta de energia. O parque industrial fica defasado em relação aos países desenvolvidos e com grande dependência externa por suprimentos e tecnologias. As pressões internacionais se intensificam em relação ao compromisso de emissões líquidas zero.

7. Alguns indicadores e sinalizadores apontarão para a concretização de um dos cenários descritos. É uma fase de monitoramento contínuo das variáveis em que o cenário passa a ser incorporado ao processo de planejamento. Nesse sentido, o monitoramento dos indicadores de desenvolvimento econômico e inovação tecnológica são base para análise da transição no Brasil. Outros indicadores referem-se aos fatores-chave do preço do petróleo, o custo das renováveis, a regulação, as políticas públicas e as pressões por sustentabilidade ambiental. Para um monitoramento detalhado, é necessário incluir as tendências e o comportamento das demais incertezas. Isso pode oferecer uma robusta visão do desempenho do setor energético nacional. E uma decisão governamental é indispensável para

que esse acompanhamento seja realizado e as medidas necessárias para correção de rumo sejam implementadas. Por enquanto não existe aparato institucional capaz de desempenhar estas funções. E por último, a questão se a sociedade e partes interessadas tomarão consciência da importância da condução dessa transição para o futuro do País (e em parte também do mundo) e o bem-estar de sua população.

8. Os procedimentos metodológicos para a construção de cenários podem ser replicados e atualizados em novos trabalhos, a partir da análise de como as variáveis aqui reunidas se comportam ao longo do horizonte 2040.

9. Esta tese reúne a visão dos especialistas e atores do setor de energia do Brasil para orientar o planejamento público e privado sobre qual caminho seguir, face às inovações que afetam a matriz energética global.

### **Limitações da Pesquisa**

- O estudo realizado buscou identificar as variáveis que interessam ao processo de transição energética em escala global e nacional. Ao trazer dados e informações disponíveis nas referências que interessam à construção de cenários, por vezes a análise não foi aprofundada no que se refere aos aspectos históricos e fatos passados, conjunturas e conexões com outras variáveis.
- O horizonte 2040 é pouco explorado por outros trabalhos e documentos, o que exigiu cautela para realizar a análise de muitas referências com a visão para 2050.
- Apesar da divisão por artigos ser importante para facilitar a publicação dos resultados, o trabalho como um todo por vezes acatou a repetição. Os ajustes de forma para a comunicação em periódicos ainda restam necessários.

### **Oportunidades para trabalhos futuros**

- Monitorar as variáveis identificadas nesse trabalho;
- Analisar o peso e interdependência das variáveis;
- Comparar cenários qualitativos e quantitativos para a transição energética;
- Estudar contornos de uma transição energética inclusiva.

## REFERÊNCIAS GERAIS (SÍNTESE)

ALLEN, R. **The British Industrial Revolution in Global Perspective**. Cambridge University Press, Cambridge, 2009.

ARKTIS. **Indústria 4.0, a quarta revolução industrial**, 2015. Disponível em: ><http://arktis.com.br/a-quarta-revolucao-da-industria>. Acesso em 18 julho de 2019.

ALVIK, Sverre & IRVINE, Mark. **The impact of COVID-19 on the energy transition**. DNV-GL, 2020. Disponível em: [https://www.dnvgl.com/energy-transition/impact-of-covid19-on-the-energy-transition.html?utm\\_campaign=GR\\_GLOB\\_20Q3\\_PROM\\_ETO\\_2020\\_Covid-19\\_Impact&utm\\_medium=email&utm\\_source=Eloqua](https://www.dnvgl.com/energy-transition/impact-of-covid19-on-the-energy-transition.html?utm_campaign=GR_GLOB_20Q3_PROM_ETO_2020_Covid-19_Impact&utm_medium=email&utm_source=Eloqua). Acessado em: 12 de julho de 2020.

ABGD. Associação Brasileira de Geração Distribuída Disponível em: <https://www.abgd.com.br/portal/>. Acessado em dezembro de 2022.

ALLEN, ROBERT C. **Backward into the future: The shift to coal and implications for the next energy transition**, 2012. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301421512002054>. Acessado em dezembro de 2022.

ANFAVEA. **Anuário da indústria automobilística brasileira (2022)**. Disponível em: Anuário ANFAVEA 2022-422-0.pdf. Acessado em agosto/2022.

BASHMAKOV, IGOR. **Three laws of energy transitions**, 2007. Disponível em: <https://go-gale.ez54.periodicos.capes.gov.br/ps/i.do?p=AONE&u=capes&id=GALE|A246715577&v=2.1&it=r>. Acessado em dezembro de 2021.

BARBOSA, Wilson Pereira Filho & AZEVEDO, Abílio Cesar Soares. **Impactos ambientais em usinas eólicas**. Itajubá: AGRENER GD, 2013. Disponível em [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/33318903/8.\\_Impactos\\_Ambientais\\_em\\_Usinas\\_Eolicas.pdf?](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/33318903/8._Impactos_Ambientais_em_Usinas_Eolicas.pdf?). Acessado em 20 de julho de 2020.

BIOFUTURE PLATFORM. **Biofuture Platform Launch Statement**, 2016. Disponível em: <http://www.biofutureplatform.org/>. Acessado em: 12 de agosto de 2020.

BLOOMBERG, **China Car Sales Slump 92% in First Half of February on Virus**, 21/2/2020. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-02-21/china-car-sales-tumble-92-in-first-half-of-february-on-virus>. Acesso em 14 de julho de 2020.

BRADFIELD, R., WRIGHT, G., BURT, G., CAIRNS, G., & VAN DER HEIJDEN, K. The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning. **Futures**, 37(8), 2005, pp. 795-812. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2005.01.003>.

BUARQUE, Sérgio C. Metodologia e técnicas de construção de cenários globais e regionais. **Texto para Discussão no 939 IPEA**. Brasília, ISSN 1415-4765, 2003.

BRASIL, MCTI. Resultados do inventário Nacional de emissões de Gases de Efeito Estufa por Unidade Federativa (2021). Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o>

mcti/sirene/arquivos/LIVRORESULTADOINVENTARIO30062021WEB.pdf. Acessado em agosto/2022.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **RenovaBio: Biocombustíveis 2030. Nota Técnica: Papel dos biocombustíveis na matriz.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-155/EPE%20-%20NT1%20-%20PAPEL%20DOS%20BIOCOMBUST%20-%20ARQUIVO%201.pdf>. Acessado em agosto/2022

\_\_\_\_\_. **Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo Documento de Apoio ao PNE 2050.** (Dezembro de 2018). Disponível em: [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br). Acessado em março/2022.

\_\_\_\_\_. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050.** Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR\\_RecursosEnergeticos%202050.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR_RecursosEnergeticos%202050.pdf). Acessado em agosto/2022.

\_\_\_\_\_. **Caderno de Preços da Geração 2021.** Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-622/CadernodePre%C3%A7osdeGera%C3%A7%C3%A3o\\_r0.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-622/CadernodePre%C3%A7osdeGera%C3%A7%C3%A3o_r0.pdf). Acessado em agosto/2022.

\_\_\_\_\_. **Plano Nacional de Energia 2050.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Brasília: MME/EPE, 2020. Acessado em agosto/2022.

CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.** Disponível em: <http://novoatlas.cepel.br/>. Acessado em agosto/2022.

CLIMATE WATCH DATA. **Historical GHG Emissions**, 2018. Disponível em: [https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end\\_year=2018&start\\_year=1990](https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2018&start_year=1990). Acessado em: junho de 2021.

CRUTZEN, P. J. & STOERMER, E. F. **The Anthropocene.** IGBP Global Change News. Nature.41, 17–18, 2000. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature14258>. Acessado em: 14 de fevereiro de 2018.

CRUZ, Michele Gomes da; GUERREIRO, Ezequiel; RAIHER, Augusta P. **A evolução da produção do Etanol no Brasil, no período de 1975 a 2009.** Documentos Estudos Técnicos-Científicos, 43 (4), out/dez. 2012.

DAVIS, Steven J. et al. **Net-zero emissions energy systems.** *Science* 360, eaas 9793(2018). Disponível em: [10.1126/science.aas9793](https://doi.org/10.1126/science.aas9793). Acessado em julho de 2023.

DIAMOND, J. **Colapso: Como as sociedades escolhem o sucesso ou o fracasso.** Ed. Record, 2005. 684p.

DE BRUYNE, P., HERMAN, J. e DESCOUTEETE, M. **Dynamic de la recherche em sciences sociales**, Vendôme, P.U.F, 1975.

DNV GL. **Energy Transition Outlook 2019**. Disponível em: <https://eto.dnvgl.com/2019/>. Acesso em 10 de janeiro de 2020.

EUROPEAN COMISSION. **Institute for Security Studies. Global trends 2030: citizens in an interconnected and polycentric world**. Paris: Euiss/Espas, 2011.

ESTADÃO. **Vendas de automóveis na China caem bruscamente em fevereiro**, 12/03/2020. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/estadao-conteudo/2020/03/12/vendas-de-automoveis-na-china-caem-bruscamente-em-fevereiro.htm?cmpid=copiaecola>. Acesso em 12 de julho de 2020.

EXAME. **Plano é investir US\$ 3 bi em energias renováveis no mundo, diz Shell**. 19/09/2019. Disponível em: <https://exame.com/negocios/plano-e-investir-us-3-bi-em-energias-renovaveis-no-mundo-diz-shell/>. Acesso em: 16 de julho de 2020.

FACIONE, P. A. **Critical thinking: a statement of expert consensus for purposes of educational assessment and instruction**. Research findings and recommendations (Report). Newark: American Philosophical Association, 1990.

FOUQUET, R. **The slow search for solutions: lessons from historical energy transitions by sector and servisse**, 2010. Disponível em: Energy Policy, 38 (11), pp. 6586-6596. Acessado em dezembro de 2021.

GEERT VERBONG, FRANK GEELS. **The ongoing energy transition: Lessons from a socio-technical, multi-level analysis of the Dutch electricity system (1960–2004)**, 2006. Disponível em: [https://editors.eol.org/eoearth/wiki/Energy\\_transitions](https://editors.eol.org/eoearth/wiki/Energy_transitions). Acessado em dezembro de 2021.

GRUBLERAB, ARNULF. **Energy transitions research: Insights and cautionary tales**, 2012. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301421512002054>. Acessado em dezembro de 2021.

GELLER, Howard Steven. **Revolução Energética - Políticas para um Futuro Sustentável**. Editora RelumeDumara, Rio de Janeiro, 2003.

GREENPEACE, **Global energy [r]evolution a sustainable global energy outlook**, 2010. Disponível em: Acesso em: 15 de outubro de 2018.

GERMANY, The Federal Government. **Climate Action Programme 2030 (2022)**. Disponível em: <https://www.bundesregierung.de/breg-en/issues/climate-action>. Acessado em: nov/2022.

GWEC. **Global Wind Report 2021**. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>. Acessado em: abr/21.

GRUBLER, A. **Energy transitions**, 2008. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301421511006987?via%3Dihub>.

\_\_\_\_\_. **Transitions energy in use**, 2004. Disponível em: <https://pdf.sciencedirectassets.com>. Acessado em dezembro de 2021.

\_\_\_\_\_. A., NAKICENOVIC, N. **Decarbonizing the global energy system**, 1996. Disponível em: <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/4848/1/RR-97-06.pdf>. Acessado em dezembro de 2021.

GODET, Michel. **Manual de prospectiva estratégica: da antecipação à ação**. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1993.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **Status Global do CCS 2021**. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>. Acessado em agosto/2022.

HUGHES, Barry. **Forecasting Globalization: The Use of International Futures (IFs)**. In George Modelski, Tessaleno Devezas, and William R. Thompson, eds., *Globalization as Evolutionary Process: Modeling Global Change*. Routledge: London and New York, 355–380, 2008.

HARARI, Y.N. **Homo Deus**. Ed. Companhia das letras, São Paulo, 2016.

HOBBSAWM, E. J. **Industry and Empire: From 1750 to the Present Day**, rev. and updated with Chris Wrigley, 2nd ed., New York: New Press. ISBN 1-56584-561-7, 1999.

\_\_\_\_\_. **A Era das Revoluções**. Europa 1789-1848. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1982.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, **World Energy Outlook-2016**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>. Acessado em: 9 de julho de 2020.

\_\_\_\_\_. **About the WEO**. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/world-energy-outlook>. Acessado em 9 de julho de 2020.

\_\_\_\_\_. **Global Energy Review 2020 Abstract The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions**, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/oil#abstract>. Acesso em 9 de julho de 2020.

IRENA, **Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050** (2019 edition), Abu Dhabi, 2020.

\_\_\_\_\_. **Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050**, Abu Dhabi, 2020.

\_\_\_\_\_. **The post-COVID recovery: An agenda for resilience, development and equality**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy Review 2021**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021?mode=overview>. Acessado em junho de 2021.

IRENA. **Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050**, Abu Dhabi, 2020.

\_\_\_\_\_. **Renewable Capacity Statistics 2021**. March 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>. Acessado em: abr/21.

\_\_\_\_\_. **Energy transition outlook (2021)**. Disponível em: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Outlook>. Acessado em dezembro de 2022.

\_\_\_\_\_. **Transforming the energy system – and holding the line on the rise of global temperatures**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IPCC. **Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001. 881pp.

\_\_\_\_\_. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.

\_\_\_\_\_. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp., 2014.

\_\_\_\_\_. **Summary for Policymakers (SR 1.5)** approved at the First Joint Session of Working Groups I, II and III of the IPCC and accepted by the 48th Session of the IPCC, Incheon, Republic of Korea, 6 October 2018.

\_\_\_\_\_. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896, 2021.

IBP. **Evolução da produção, exportação e importação de petróleo no Brasil**, 2022. Disponível em: [www.ibp.org.br](http://www.ibp.org.br). Acessado em agosto/2022.

IBP. **Relevância do petróleo para o Brasil (2019)**. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2019/08/ey-relevancia-do-petroleo-brasil.pdf>. Acessado em agosto/2022.

IEA. **Global coal demand is set to return to its all-time high in 2022**. Disponível em: <https://www.iea.org/news/global-coal-demand-is-set-to-return-to-its-all-time-high-in-2022>. Acessado em agosto/2022.

IEA. **Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level**, 2022. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf>. Acessado em agosto/2022.

IEA. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions** (2021). Disponível em: <https://www.iea.org/news/clean-energy-demand-for-critical-minerals-set-to-soar-as-the-world-pursues-net-zero-goals>. Acessado em dezembro de 2022.

IRENA and ILO (2022), **Renewable energy and jobs: Annual review 2022**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi and International Labour Organization, Geneva.

JIAN-KUNHE. **Objectives and strategies for energy revolution in the context of tackling climate change**, 2015. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1674927815000441?via%3Dihub> Acessado em dezembro de 2022.

KPMG INTERNATIONAL. **Future State 2030: the global megatrends shaping governments**. Toronto: KPMG, 2013. Disponível em: <http://goo.gl/vST7ST>>. Acessado em: 17 fev. 2014.

KUHN, Thomas S. **La Structure des révolutions scientifiques**, St-Amand, Flammarion, Colecção Champs, 1983.

LE QUÉRÉ, C., JACKSON, R.B., JONES, M.W. et al. **Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID-19 forced confinement**. Nat. Clim. Chang. 10, 647–653 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>.

LINSTONE, H. A., & TUROFF, M. (2002). **The Delphi method: Techniques and applications**. Addison Wesley Newark, NJ: New Jersey Institute of Technology. Disponível em: <https://web.njit.edu/~turoff/pubs/delphibook/index.html>>. <https://web.njit.edu/~turoff/pubs/delp>. Acessado em outubro de 2022.

MARCIAL, Elaine Coutinho e GRUMBACH, Raul José dos Santos. **Cenários Prospectivos: como construir um futuro melhor**. 5. Ed ver. Ampl. – Rio de Janeiro: Editora FGV, 2008.

NRDC. **New NRDC Tool Compares Electric Generation Cost by Resource**, 2019. Disponível em: <https://www.nrdc.org/experts/madhur-boloor/new-nrdc-tool-compares-electric-generation-cost-resource>. Acessado em: abril/21.

NASDAQ. **Crude Oil Prices from 1861**, 2021. Disponível em: [https://data.nasdaq.com/data/BP/CRUDE\\_OIL\\_PRICES-crude-oil-prices-from-1861](https://data.nasdaq.com/data/BP/CRUDE_OIL_PRICES-crude-oil-prices-from-1861). Acessado em: abril/22.



NATURE. **COVID curbed carbon emissions in 2020 — but not by much** (Jan 2021). Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-021-00090-3>. Acesso em: setembro 2021.

NRDC. **Revolution now the future is here for clean energy technology**, 2018. Disponível em: <https://www.nrdc.org/>. Acesso em 12 de julho de 2020.

MENEGUZZO, FRANCESCO, CIRIMINNA, ROSARIA, ALBANESE, LORENZO, PAGLIARO, MARIO. **The great solar boom: a global perspective into the far reaching impact of an unexpected energy Revolution**, 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.98>. Acessado em dezembro de 2021.

MICHAEL LEVI, ELIZABETH C. ECONOMY, SHANNON O'NEIL AND ADAM SEGAL. **Globalizing the energy revolution: how to really win the clean-energy race**, 2010. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S030142151200225X>. Acessado em dezembro de 2021.

MOKYR, J. **The Enlightened Economy**. Penguin Books, London, 2009.

ODUM, E.P. **Fundamental of Ecology**. 3rd Edition, W.B. Saunders, Philadelphia, 1971.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Environmental outlook to 2050: executive summary**. Paris: OECD Publishing, 2012. v. 1. Disponível em: <<http://goo.gl/KrT4Mb>>. Acessado em: abril/21.

PEARSON, Peter J.G. & FOXON, Timothy J. **A low carbon industrial revolution? Insights and challenges from past technological and economic transformations**. Energy Policy 50 (2012) p. 117–127.

PETROBRÁS. **Cenários Petrobras - 2040 —Visões de futuro para um mundo em transformação**. 2018.

PORTER, Michael E. (orgs) **Estratégia: a busca da vantagem competitiva**. Rio de Janeiro: Campus, 1998.

PETROBRAS. **Desempenho financeiro – 1º semestre de 2022**. Disponível em: [https://www.agenciapetrobras.com.br/upload/documentos/apresentacao\\_8chDtayCsI.pdf?\\_gl=1\\*1jl6ygf\\*\\_ga\\*MTIyNDQwNTA5NC4xNjYyNTExOTQw\\*\\_ga\\_9TG5WL85H3\\*MTY2MjUxMTk0Mi4xLjEuMTY2MjUxMjA4MC4yNi4wLjA](https://www.agenciapetrobras.com.br/upload/documentos/apresentacao_8chDtayCsI.pdf?_gl=1*1jl6ygf*_ga*MTIyNDQwNTA5NC4xNjYyNTExOTQw*_ga_9TG5WL85H3*MTY2MjUxMTk0Mi4xLjEuMTY2MjUxMjA4MC4yNi4wLjA). Acessado em julho de 2022.

PETROBRAS. **Pressa no Pré-sal**, 2022. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/pressa-no-pre-sal.htm>. Acessado em: out de 2022.

REN21. **Renewables Global Futures Report: Great debates towards 100% renewable energy**. Paris: REN21 Secretariat, 2017.

RIFKIN, J. **The Third Industrial Revolution**. Palgrave Macmillan. 304 págs, 2012.

SACHS, I. **A revolução energética do século XXI. Estudos Avançados.** 21 (59): 21–38. 2007.

\_\_\_\_\_. **Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável.** 2ª Ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.

SANTOS, Milton. **A Natureza do Espaço. Técnica e Tempo.** Razão e Emoção. Hucitec, São Paulo, 1996.

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial.** São Paulo: Edipro, 2016.

SHELL. **Cenários sob novas lentes: mudanças de perspectiva para um mundo em transição.** Rio de Janeiro: Shell, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/FzDN9S>>. Acesso em: 17 fev. 2014.

SHELL. **Scenarios: An Explorer's Guide, Exploring the Future,** London: Shell International Limited, 2003.

SMIL, Vaclav. **Energy and civilization: a History.** Cambridge, MA: The MIT Press, 2017.

\_\_\_\_\_. **Energy Transitions: Global and National Perspectives.** Editora Praeger, 2016.

STEFFEN, W.L. et al. **Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure.** Stockholm : IGBP Secretariat, 2004.

TESKE, Sven. **[R] Evolução Energética.** Erec (Conselho Europeu de Energia Renovável); GWEC (Conselho Internacional de Energia Eólica); Greenpeace Internacional, 2013. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/brasil>. Acessado em 1 junho de 2018.

UNFCCC. **United Nations Framework Convention on Climate Change,** 1992. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>. Acesso em 16 de junho de 2018.

\_\_\_\_\_. **Paris Agreement,** 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acessado em: julho de 2019.

UNEP – United Nations Environment Programme. **The GEO-3 scenarios 2002-2032.** Nairobi: Unep, 2004. Disponível em: <<http://goo.gl/79tkwO>>. Acessado em: fev/2019.

WALTER, Osvaldo Luiz. **História de eletricidade.** Mogi Mirim, 2010. Disponível em: <http://univasf.edu.br/~edmar.nascimento/iee/1HistoriaEletricidade.pdf>. Acesso em 21 fev. 2020.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Scenarios: Composing energy futures to 2050 – Executive Summary.** World Energy Council Regency House 1–4 Warwick Street London W1B 5LT United Kingdom, 2013. Disponível em: [www.worldenergy.org/publications/2013/world-energy-scenarios-composing-energy-futures-to-2050](http://www.worldenergy.org/publications/2013/world-energy-scenarios-composing-energy-futures-to-2050).

WORLD ECONOMIC FORUM. **Fostering Effective Energy Transition 2021 edition.** Disponível em: <https://www.weforum.org/reports>. Acessado em: maio/2021.

WRIGLEY, E.A. **Energy and the English Industrial Revolution**. United Kingdom: University Press, Cambridge, 2010.

SACHS, Ignacy. **A revolução energética do século XXI**. Estudos Avançados. 21 (59): 21–38. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142007000100004>.

SHELL. **Cenários sob novas lentes - mudança de perspectiva para um mundo em transição**, 2013. Disponível em: <https://www.shell.com.br/energia-e-inovacao/futuro-da-energia/shell-cenarios/>. Acessado em: 16 de julho de 2020.

SHELL. **Sky Scenario**. Disponível em: <https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/shell-scenario-sky.html>. Acessado em 18 de agosto de 2020.

SCHWARTZ, P. **Scenario Planning: Managing for the future**. England: Wet Sussex, 1998.

\_\_\_\_\_. **A arte da visão a longo prazo. Planejando um futuro em um mundo de incertezas**. 4ª ed. – Rio de Janeiro: Best Seller, 2006.

SUN TZU, **A Arte da Guerra**, Editora Record, Rio de Janeiro, 2001.

TALEB, Nassim Nicholas. **A Lógica do Cisne Negro: O Impacto do Altamente Improvável**. Editora Best Seller, 2015.

THE GLOBAL CARBON ATLAS. **CO2 Emissions**. Disponível em: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>. Acessado em: 13 de julho de 2020.

VAN DER HEIJDEN, K. **Scenarios – the art of strategic conversation**. Chichester, Nova York, Brisbane, Toronto, Singapura: John Wiley & Sons, 1996.

WACK, Pierre. **Scenarios: uncharted waters ahead**. Harvard Business Review, p. 72-89, Sept./Oct. 1985.

WORLD BANK. **Global Economic Prospects**, June 2020. Washington, DC: World Bank, 2020. DOI: 10.1596/978-1-4648-1553-9.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The A-Z of the Energy Transition: Knowns and Unknowns. 2020**. Disponível em: [www.weforum.org](http://www.weforum.org). Acessado em: maio/2020.

WORLD ENERGY COUNCIL. **COVID-19 Global Survey Results**, 2nd round, June 2020. Disponível em: [www.worldenergy.org](http://www.worldenergy.org). Acessado em 19 de julho de 2020.

RACKLEY, Stephen A. **Carbon Capture and Storage**. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-1-85617-636-1. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-19306-6>, 2010.

SEEG, **Análise das emissões brasileiras de e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020 gases de efeito estufa**. Disponível em: [https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG\\_9/OC\\_03\\_relatorio\\_2021\\_FINAL.pdf](https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf). Acessado em agosto/2022.

OCDE. **The Climate Action Monitor 2022**. Disponível em: <https://www.oecd.org/climate-action/ipac/the-climate-action-monitor-2022-43730392/>. Acessado em dezembro de 2022.

PEREZ, C. **Technological change and opportunities for development as a moving target.** CEPAL Review, v. 75, p. 109–130, 2001.

\_\_\_\_\_. **A green and socially equitable direction for the ICT paradigm.** Globelics – Global Network for Economics of Learning, Innovation, and Competence Building Systems, 2014.

\_\_\_\_\_. **Capitalism, technology and a green global golden age: the role of history in helping to shape the future.** In: JACOBS, M.; MAZZUCATO, M. (Ed.). Rethinking Capitalism: Economics and Policy for Sustainable and Inclusive Growth. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2016.

\_\_\_\_\_. **Innovation systems and policy for development in a changing world.** In: FAGERBERG, J.; MARTIN, B. R.; ANDERSEN, E. S. (Ed.). Innovation studies: evolution and future challenges. Oxford: Oxford University Press, 2013. p. 90–110.

\_\_\_\_\_. **Technological revolutions and financial capital: the dynamics of bubbles and golden ages.** Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2002.

\_\_\_\_\_. **Technological revolutions and techno-economic paradigms.** Cambridge journal of economics, Oxford University Press, v. 34, n. 1, p. 185–202, 2010.

\_\_\_\_\_. **Transitioning to smart green growth: lessons from history.** In: FOUQUET, R. (Ed.). Handbook on Green Growth. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2019. p. 447–463.

\_\_\_\_\_. **Unleashing a golden age after the financial collapse: Drawing lessons from history.** Environmental Innovation and Societal Transitions, Elsevier, v. 6, p. 9–23, 2013.

SIVARAM, VARUN, NORRIS, TERYN. **The clean energy revolution: fighting climate change with innovation.** Disponível em: <https://go-gale.ez54.periodicos.capes.gov.br/>. Acessado em dezembro de 2021.

SOLOMON, BARRY D., KRISHNAB, KARTHIK. **The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook.** Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301421512002054>. Acessado em dezembro de 2021.

VAN RENSSSEN, SONJA. **An energy Revolution**, 2012. Disponível em: Nature Climate Change. Acessado em dezembro de 2021.

RIFKIN, J. **The Third Industrial Revolution.** Palgrave Macmillan. 304 págs, 2012.

SMIL, Vaclav. **Energy and civilization: a History.** Cambridge, MA: The MIT Press, 2017.

\_\_\_\_\_. **Energy Transitions: Global and National Perspectives.** Editora Praeger, 2016.

SACHS, Ignacy. **A revolução energética do século XXI.** Estudos Avançados. 21 (59): 21–38. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142007000100004>.

SCHWARTZ, P. **Scenario Planning: Managing for the future.** England: Wet Sussex, 1998.

\_\_\_\_\_. **A arte da visão a longo prazo.** Planejando um futuro em um mundo de incertezas. 4ª ed. – Rio de Janeiro: Best Seller, 2006.

## GLOSSÁRIO

Combustíveis fósseis - petróleo, o carvão mineral e o gás natural.

Descarbonização - redução e/ou eliminação da emissão de gás carbônico nas atividades das pessoas e empresas em geral

Economia de baixo carbono - economia baseada em fontes de energia que produzem baixos níveis de emissões de gases do efeito estufa (GEE).

Energias intermitentes - são aquelas geradas por fonte energética que não pode ser armazenada em sua forma original e, por isso, só é transformada em eletricidade enquanto o recurso estiver disponível no sistema de geração. A geração terá um desempenho variável durante o dia, havendo pausas e retomadas, conforme a disponibilidade da fonte principal utilizada.

Energias renováveis - utilizam-se de recursos não esgotáveis (radiação solar, os ventos, a energia hidráulica, a biomassa, o calor geotérmico e outros).

Gases do Efeito Estufa - São substâncias capazes de absorver a radiação infravermelha refletida pela Terra após absorção da luz solar. A consequência dessa propriedade é o aumento da temperatura da superfície do planeta, o que permitiu o desenvolvimento da vida em nosso planeta. Contudo, a ação antrópica tem aumentado a concentração dos GEEs de forma descontrolada, gerando efeitos climáticos adversos, entre eles o aquecimento global.

Hidrocarbonetos - compostos formados apenas por átomos de hidrogênio e carbono e são os principais constituintes do petróleo que é formado a partir da deposição de matéria orgânica no fundo de mares e lagos e da sedimentação desse material sob altas pressões e temperaturas. O petróleo pode ter em sua composição hidrocarbonetos cujas moléculas possuem trinta carbonos ou mais. Os principais gases de efeito de estufa na atmosfera da Terra são o vapor de água (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e ozônio (O<sub>3</sub>).

Hidrogênio - elemento químico de símbolo H e número atômico 1 da tabela periódica. Trata-se do elemento mais simples conhecido, cujo átomo é formado apenas por um próton e nenhum nêutron.

Objetivos do Desenvolvimento Sustentável - 17 objetivos ambiciosos e interconectados que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no mundo.

Pré-sal - área de reservas petrolíferas que fica debaixo de uma profunda camada de sal, formando uma das várias camadas rochosas do subsolo marinho.

Smart grids - redes elétricas que podem integrar de forma inteligente e dinâmica as ações de todos os usuários conectados a elas — aqueles que geram energia, aqueles que a consomem ou aqueles que fazem ambas as coisas — a fim de fornecer eletricidade de forma eficiente, sustentável, econômica e segura.

Transição energética - mudanças significativas na estrutura da matriz energética primária mundial. Caracteristicamente, as transições energéticas são processos complexos, podendo haver variações de estágio e de ritmo das transformações em diferentes países, regiões ou localidades. Ou seja, em geral, não se trata de um processo linear e de ruptura, mas de longa coexistência entre a fonte que a caracteriza e as fontes que são progressivamente substituídas.

Fatores que envolvem transição de infraestrutura de produção, transporte e utilização de energéticos, são alguns que explicam a lenta transição de sistemas energéticos em nível mundial. O atual processo de transição energética tem sido embasado por condicionantes como desenvolvimento sustentável, mudanças climáticas e inovações tecnológicas associadas à eletrônica e à entrada na era digital. Assim, o processo de transição energética vigente consiste em um processo de transformações em direção a uma economia de baixo carbono e menor pegada ambiental. Nesse contexto, há estímulos ao uso mais eficiente dos recursos energéticos e à redução da participação de combustíveis mais intensivos em emissões de carbono na matriz energética primária mundial em favor de fontes de baixo carbono (sobretudo renováveis e o gás natural como combustível de transição), bem como à eletrificação em processos de conversão de energia. Ademais, tal processo ocorre associado à maior automação e digitalização de processos, controles e serviços, possibilitando tanto o aumento da eficiência energética como a maior participação de fontes renováveis não-despacháveis (e.g., eólica e solar) (Fonte: PNE 2050).

Ventania - Vento forte e contínuo.

Zero líquido (Net zero) - zerar as emissões líquidas (diretas e indiretas) de gases do efeito estufa – sobretudo o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que é o mais abundante na atmosfera. Além disso, prevê a compensação de todo o lançamento dessas substâncias poluentes no ar.

## APÊNDICES

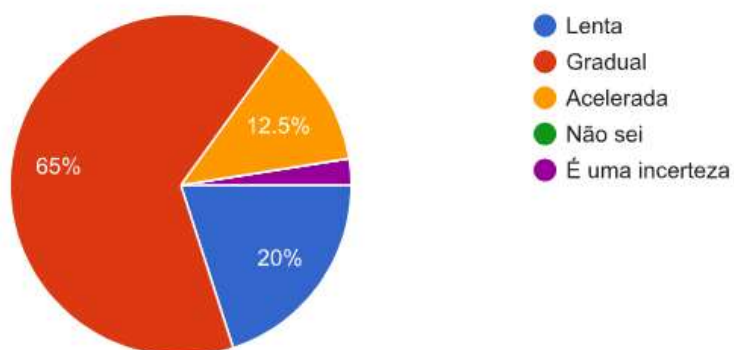
### Apêndice 1 - Identificação das variáveis mais importantes e menos importantes para a transição energética no Brasil.

Quais itens você considera como aspectos cruciais para transição energética no Brasil? Obs: marcar três (+) e os três (-).	(-)	(+)
Substituição dos combustíveis fósseis	-12	7
Políticas públicas	-3	17
Regulamentação	-3	23
Incentivos	-8	5
Novas tecnologias	-2	9
Custos das novas tecnologias	-5	10
Pesquisa	-3	4
Investimento	-1	8
Maior envolvimento do consumidor	-6	4
Foco na sustentabilidade	-6	2
Garantia de acesso a energia	-12	1
Aumento da oferta de energia	-5	5
Aumento da demanda de energia	-8	4
Novos empregos	-16	1
Instituições estáveis	-6	7
Governança	-4	7
Não sei	-1	0

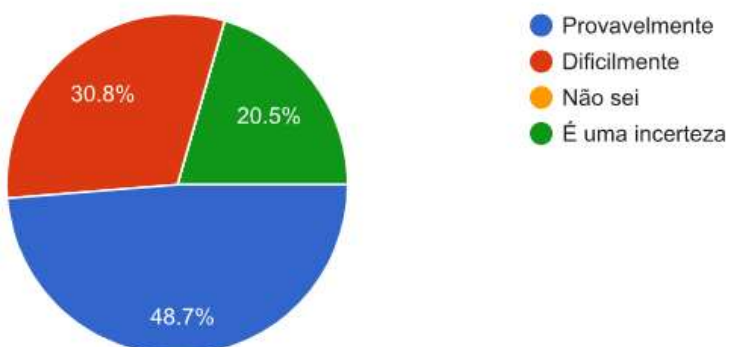


## Apêndice 2 - Questionário para identificar as variáveis com maior grau de incerteza e mais importantes para a transição energética no Brasil 2040.

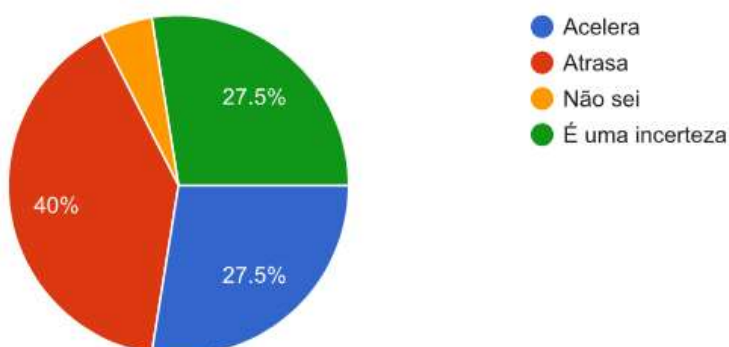
1. Qual a velocidade da transição energética no Brasil até 2040?



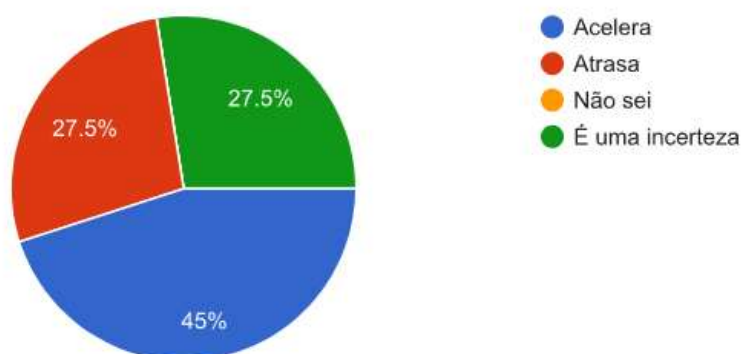
2. O Brasil conseguirá, até 2050, alcançar Net Zero em emissões, conforme compromisso declarado em durante a COP26?



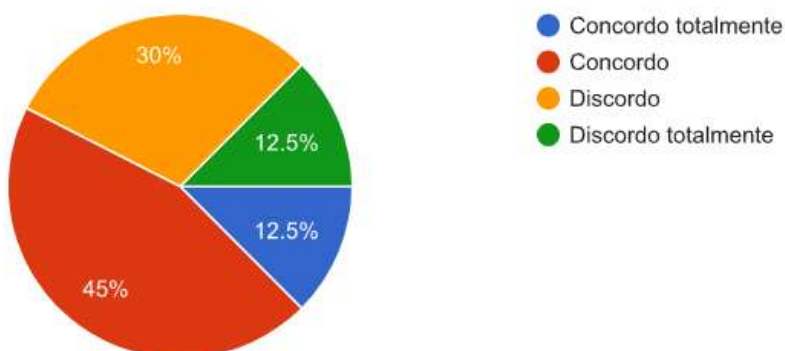
3. Numa visão geral, a pandemia de Covid-19 acelera ou atrasa uma transição energética sustentável no Brasil?



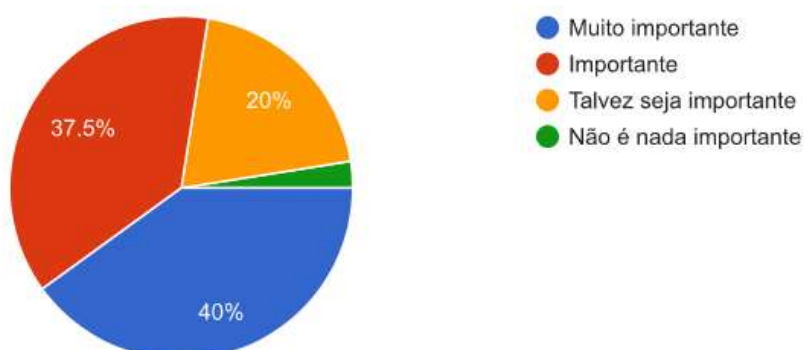
4. Numa visão geral, a guerra Rússia x Ucrânia acelera ou atrasa uma transição energética sustentável no Brasil?



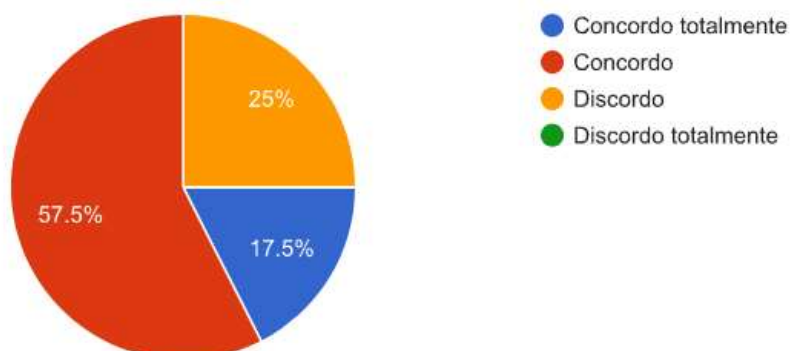
5. Até 2025, os países ricos mobilizarão 100 bilhões por ano, conforme o Acordo de Paris, para financiamento climático a países emergentes?



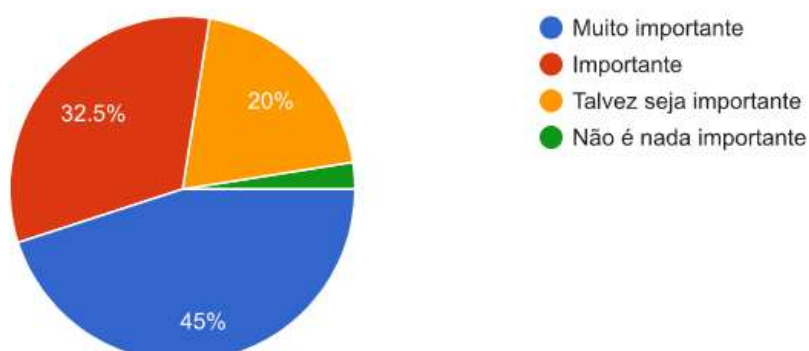
5.1 Grau de importância da questão 5 para a Transição Energética no Brasil?



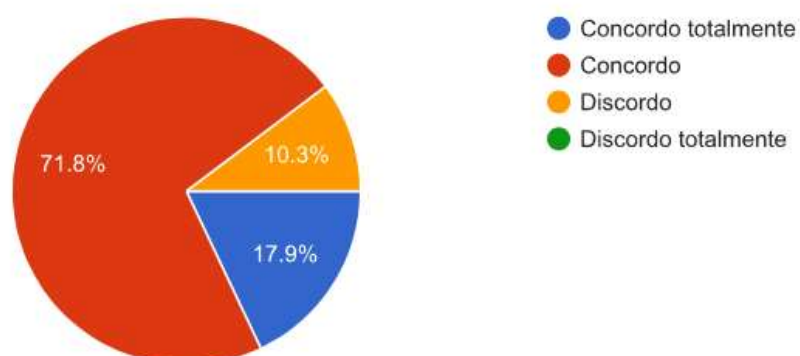
6. Os biocombustíveis (etanol, biodiesel e bioquerosene) ganham competitividade em relação aos combustíveis fósseis antes de 2040?



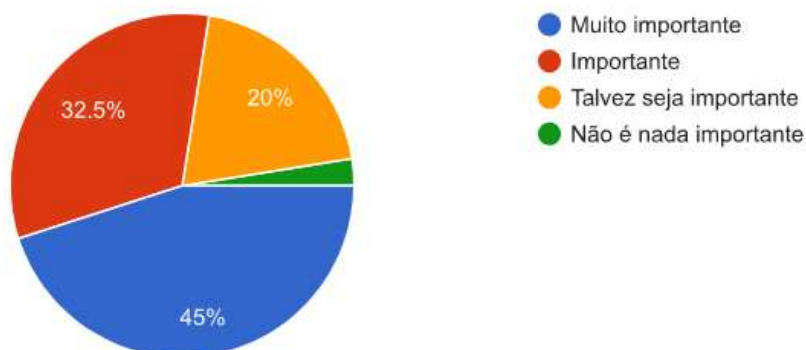
6.1 Grau de importância da questão 6 para a Transição Energética no Brasil



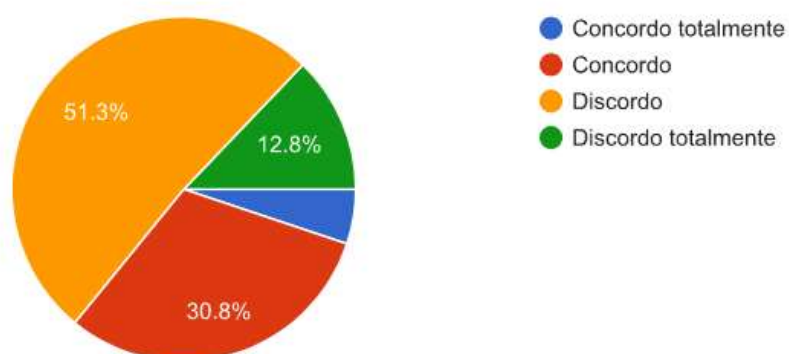
7. O Brasil alcançará 10% em ganhos de eficiência no setor elétrico até 2040?



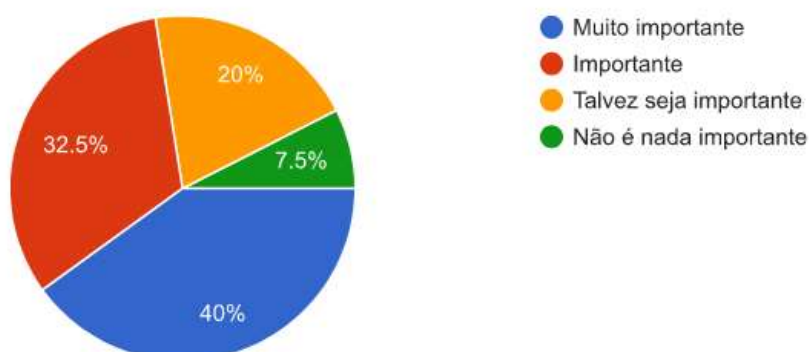
### 7.1 Grau de importância da questão 7 para a Transição Energética no Brasil



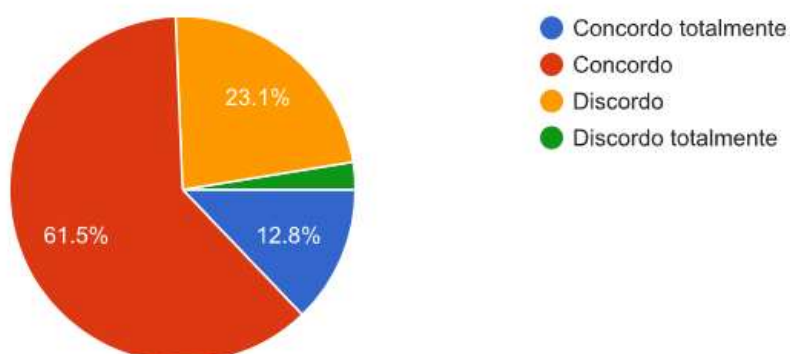
### 8. O preço do barril de petróleo atingirá seu menor preço em 2040? (Visão a partir de 2022).



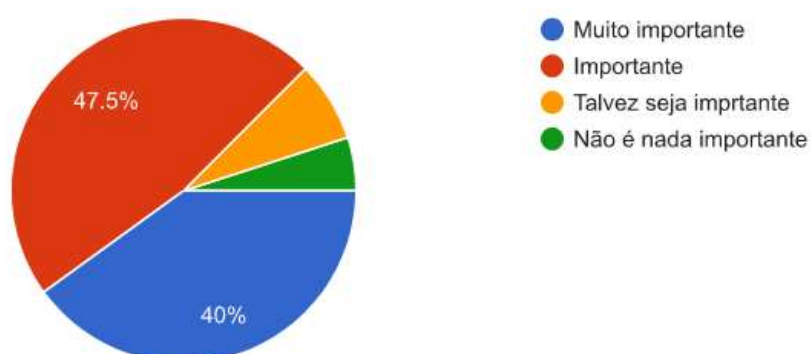
### 8.1 Grau de importância da questão 8 para a Transição Energética no Brasil



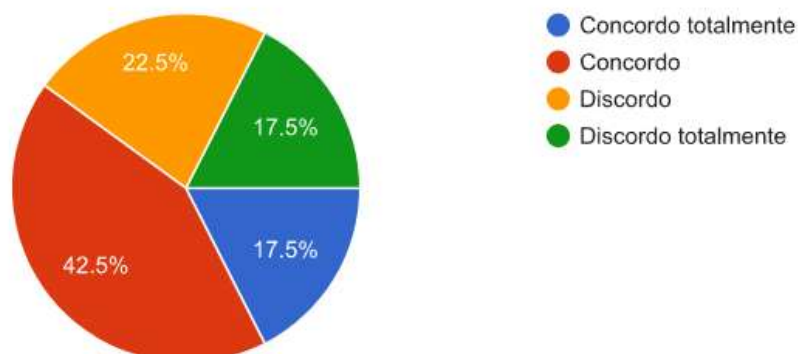
9. Os enormes subsídios concedidos ao setor de combustíveis fósseis ao ano (no Brasil, US\$21 bi e no mundo, US\$ 5,2 tri em 2018) serão reduzidos até 2040?



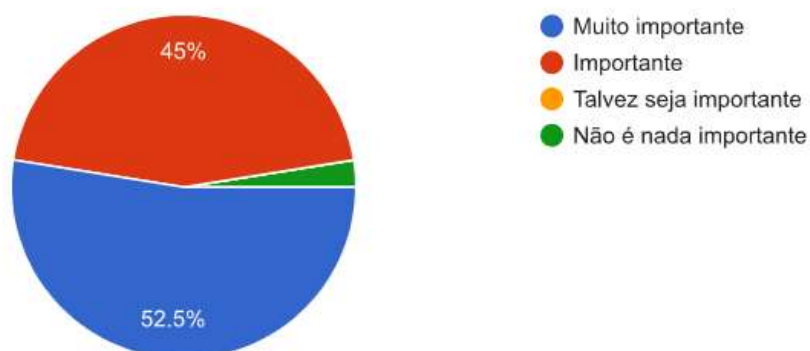
9.1 Grau de importância da questão 9 para a Transição Energética no Brasil



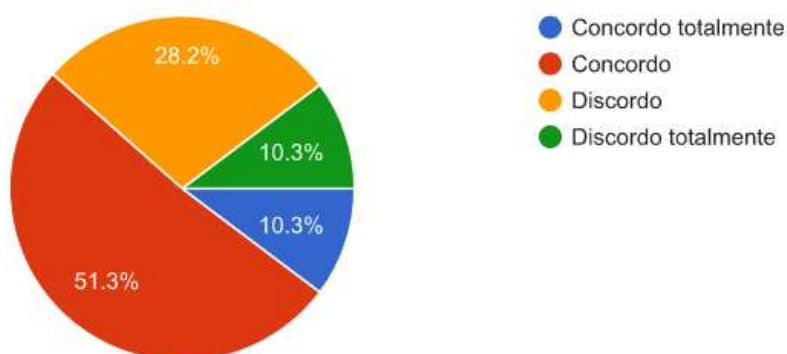
10. O governo brasileiro está comprometido com a transição energética de maneira a oferecer segurança para investimentos até 2040?



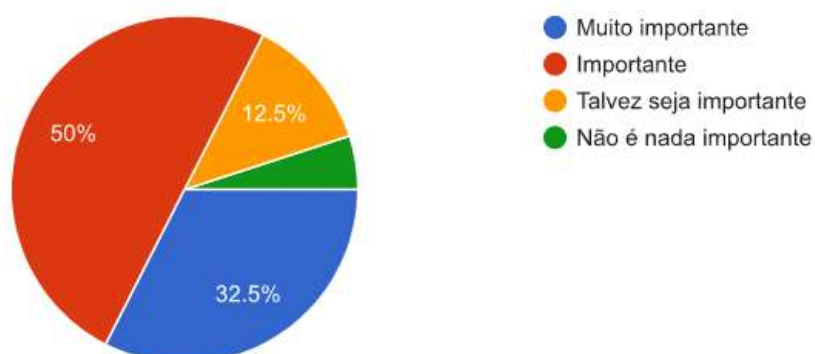
## 10.1 Grau de importância da questão 10 para a Transição Energética no Brasil



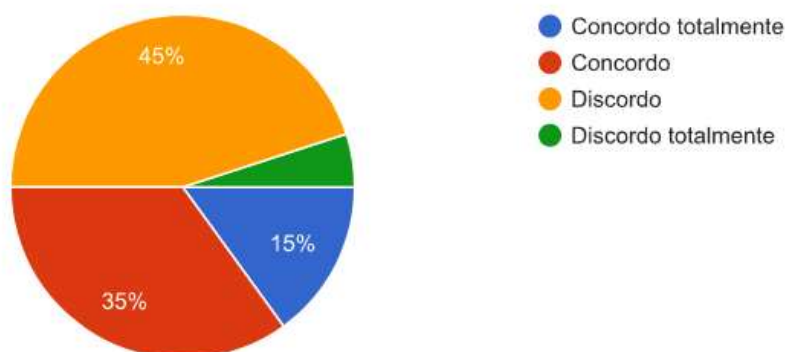
## 11. A Petrobrás envidará alterações significativas no seu portfólio de negócios com foco em uma matriz energética renovável até 2040?



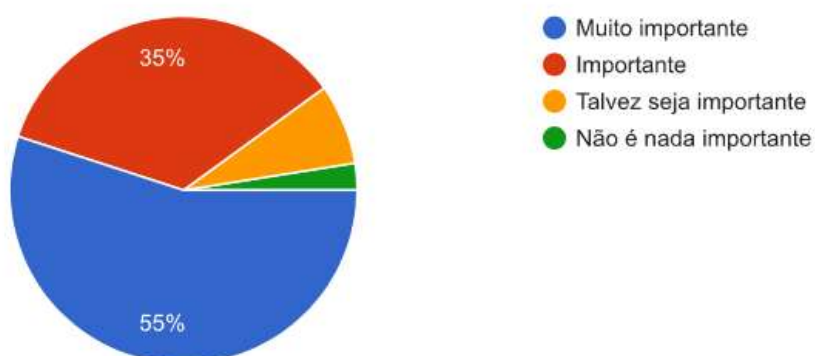
## 11.1 Grau de importância da questão 11 para a Transição Energética no Brasil



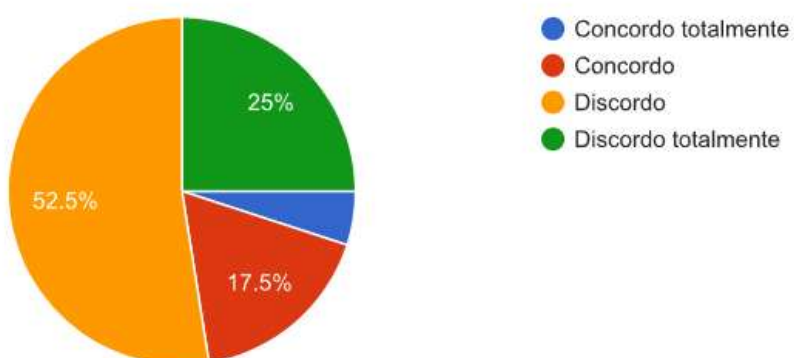
12. Energias renováveis representarão 80% da matriz energética brasileira em 2040? (Em 2019, 46% da matriz era renovável).



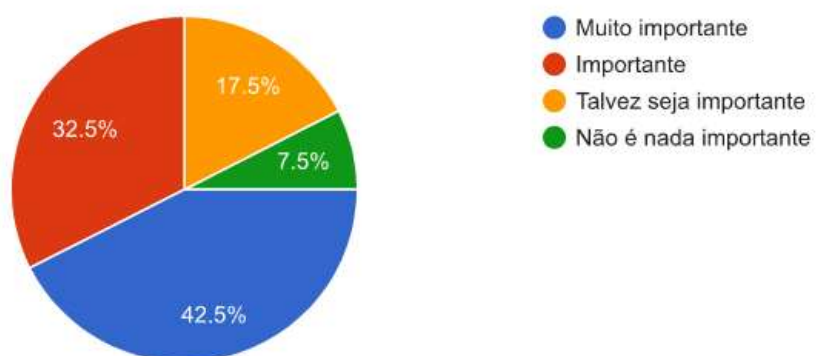
12.1 Grau de importância da questão 12 para a Transição Energética no Brasil



13. Os carros elétricos representarão 50% da frota nacional em 2040?



## 13.1 Grau de importância da questão 13 para a Transição Energética no Brasil





### Apêndice 3 – Lista dos participantes da pesquisa (questionários)\*

	Nome	Organização	Cargo/Função
1	Adriano Pires	CBIE	Diretor
2	André Bobek Lopes	Itamaraty Consulting	Consultor
3	Andre Luiz Rodrigues Osório	MME	Diretor
4	André Luiz Rodrigues Osório	MME	Diretor de Departamento
5	Antenor Rocha		
6	Antonio Benjamin		Economista
7	Antonio Fernando Pinheiro Pedro	Pinheiro Pedro Advogados	Sócio
8	Antonio Perez Puente	Grupo Brenmand Energia	Diretor
9	Ariane Fucci Wady	Unicamp	Doutoranda
10	Armando José Pereira de Barros	ETN - Extremoz Transmissora do Nordeste S.A.	Diretor
11	Ayri Trancoso	Petrobrás	Economista Senior
12	Benedito Noronha	ARSESP	Especialista em Regulação e Fiscalização
13	Bruno Eutáquio	MME	Diretor
14	Carlos Montovani	Airon Otimização em Energia LTDA	Diretor de Desenvolvimento de Negócios
15	Carlos Pires do Rio	Zane Tecnologia da Informação Ltda	Sócio
16	Catharine Maciel Brasil	NEOENERGIA	Especialista
17	Celso Dall'Orto	PSR	Gerente de projetos
18	Cileno	Exército Brasileiro	Coronel
19	Cleverson Moraes Silveira	Elejor	Diretor
20	Daniel Stipen	Energisa	Especialista em planejamento estratégico
21	Ederson Persira Madruga	Certaja Energia	Gerente comercial
22	Edmundo Alfred Pochmam da Silva	ABRAGET	Consultor
23	Eduardo Luzio	USP (Dep. Econ.)	Prof. Economia
24	Eduardo Moreno	Vitalux Ecoativa	Diretor presidente
25	Eduardo Tosta	ABDI	Analista de Produtividade e Inovação
26	Elaine C. Marcial	Universidade Católica de Brasília	Professor/pesquisador
27	Elandro Luis Marques da Silva	Certaja Energia	Gerente de Distribuição
28	Esdras Ramos	MME	Assessor Técnico Especializado
29	Fabio Rubens Soares	Enviroserbices	Diretor
30	Fábio Takahashi	Santander - Mesa de Energia	Gerente
31	Fabiola Sena	Statkraft	Diretora de Assuntos Regulatórios
32	Fausto de Bessa Braga	Professional Liberal	Consultor
33	Fausto de Paula Menezes Bandeira	Companhia Energética de Brasília	Diretor de Planejamento e Gestão de Riscos
34	Felipe Regis de Souza Pontes	Eletron	Advogado
35	Fernando Amaral de Almeida Prado Jr	Sinerconsult / Escola Politécnica da USP	Sócio
36	Fernando Luiz Zancan	associação brasileira do carvão mineral - abcm	presidente
37	Fernando Porrua	PSR	Diretor Técnico
38	Filipe Bordalo Di Luccio	BNDES	Gerente na Área de Desestatização
39	Gabriel Leuzinger	Universidade de Brasília	Doutorando
41	Gilmar dos Santos Marques	FAPDF	Coordenador de Tecnologia e de Inovação
42	Gilmar Nunes da Silva	Engie - Brasil Energia S.A	Consultor de contratos e contabilização
43	Gustavo Castro	Embrapa	Diretor
44	Gustavo Pires da Ponte	EPE	Superintendente adjunto
45	Gustavo Ponte	EPE	Consultor Técnico
46	Gustavo Spadotti	Embrapa	chefe-geral
47	Homero Zanotta	Instituto Sagres	Consultor
48	Isabel Lustosa	Ulhoa Canto Advogados	Sócia
49	Ivan Nord	Atiaia Energia	Gerente de Regulação
50	Jackson Gama Jr	Eneva	Gerente de Operações
51	Jairo Terra	PSR	Consultor
52	Jefferson Scofield	Presidência da República	Diretor
53	José Antonio Sorge	Ágora Energia	Sócio Diretor
54	josé dilcio rocha	embrapa	pesquisador
55	José Guilherme Machado	GNA	Analista de Inteligencia de Mercado e Regulação
56	José Henrique Araújo Cordeiro da Silva	Banco do Brasil	Assessor de TI
57	José Lavaquial	HUBZ	Diretor
58	José Nelson Quadrado Junior	Energisa Mato Grosso	Gerente de Planejamento e Orçamento
59	José Renato Santana Vianna	hubz	gestor de projeto
60	Julio Grudzien Neto	Companhia Paranaense de Energia (Copel)	Gerente de Regulação
61	Leandro César Xavier de Carvalho	Engie	Coordenador de Risco
62	Leonam Guimarães	Eletronuclear S.A.	Diretor-Presidente
63	Leonel Santos	Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos	Analista de Planejamento e Orçamento
64	Levi Souto Jr	ZE Consultoria e Engenharia	Sócio
65	Lucas Fragas	Rosatomb	Marketing
66	Luiz Barroso	PSR	CEP
67	Luiz Carlos Fonte Nova de Assumpção	Acelen	Coordenador de SGSO
68	Marcelo Conforto de Alencar Moreira	Secretaria de Assuntos Estratégicos - PR	Diretor de Desenvolvimento Econômico e Social
69	Marcelo Freire de Paiva	Sigma Lithium - A10 Investimentos	Board Member - Cofundador
70	Marcelo Mendes	Corumba Concessões S/A	Presidente

\* Na lista constam somente participantes que autorizaram a divulgação do nome, organização e função.

71	Marco Antonio Tavares Queiroz	Chesf	Economista
72	Marcondes Moreira De Araujo	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI)	Analista Senior C&T
73	Marcos Miguel Lobo Rodrigues	Eneva	Gerente de Manutenção e Engenharia
74	Marcus Venicius Virgínio de Sousa	CTEM+	Professor
75	Marina de Abreu Azevedo	Instituto E+ Transição Energética	Consultora Técnica
76	Mateus Alves Cavaliere	PSR	Consultor
77	Maurício Pazini Brandão	Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (SAE-PR)	Diretor de CT&I
78	Maycon Georgio Vendrame	ITAIPU Binacional	Gestor de projetos de energias renováveis
79	Natalia Moura de Oliveira	ABRACE	Analista
80	Ney Zanella dos Santos	ENBPar	Presidente
81	Nilo Teixeira	MME	Analista
82	Nome:	Organização	Cargo
83	Odilon Leite de Andrade Neto	Empresa Brasileira de Participações em Energia Nuclear e Binacional S.A. - ENBPar	Chefe de Gabinete da Presidência
84	Odilon Mazzini Junior	Secretaria Especial de Modernização do Estado - SGPR	Secretário Especial Adjunto
85	Orlando Ribas	Ponte Nova Energia	Diretor
86	Otávio Griko	Foz do Chapecó Energia	Diretor
87	Pablo Silva	emasenergia	Diretor
88	Paulo Cesar dos Santos	SAE/Presidência da República	Analista
89	Paulo Henrique Gulin Gomes	Paineira Participações LTDA	Diretor
90	Paulo Milani	SAE/Presidência da República	Analista de C&T
91	Paulo Nogueira	Empresa Brasileira de Participação em Energia Nuclear e Binacional - ENBPar	Assessor de Relações Institucionais e Internacionais
92	Pedro Lusz	UnB-CDS - Rede Clima	Doutorando - pesquisador
93	Pedro Prudente Corrêa	MPC Enex Energia	Trader de Originação
94	Peter Eric Volf	BAESA, ENERCAN e CERAN	Diretor Superintendente
95	Ramon Haddad	State Grid Brazil Holding	Vice Presidente
96	Ricardo Neves de Miguel	Ideal Energia	Diretor
97	Roberto Barbieri	ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica	Assessor da área de Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica
98	Roberto Sattamini	Gás Natural AÇU	Consultor de projetos
99	Samuel José de Castro Vieira	Energia S.A	Especialista de Regulação
100	Samuel Ramos de Carvalho Cavalcanti	SAE/PR	Assessor
101	Sofia Barbosa	Ulhoa Canto	Advogada
102	Solange David	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE	Vice-presidente do Conselho de Administração
103	Thiago Barral	EPE	Diretor
104	Victor Hogo Icca	ABRACE	Coordenador
105	Wesly Jean	UNB	Engenheiro
106	Wladimir Lacerda de Moura	Neoenergia	Especialista

\* Na lista constam somente participantes que autorizaram a divulgação do nome, organização e função.