

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

TALITA OLIVEIRA

**EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA EM COMPARAÇÃO COM
OUTROS PAÍSES**

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de
Engenharia Química da Universidade Federal de São
Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Fernando Furlan

SÃO CARLOS – SP

2022

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 12 de abril de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Felipe Fernando Furlan, DEQ/UFSCar

Convidado: Prof. Dr. Antonio Carlos Luperni Horta, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Ernesto Antonio Urquieta-Gonzalez, DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Sou eternamente grata à minha família, que não mediu esforços para me encorajar na jornada da minha graduação. Me apoiam incondicionalmente em momentos difíceis e vibram a cada conquista.

Aos meus amigos do curso de graduação, que me proporcionaram uma rica troca de experiências e vivências, Em especial o Mateus, que dividiu comigo momentos estressantes, divertidos e de muitos aprendizados.

Aos meus companheiros do karatê e do atletismo, responsáveis por me tornar uma pessoa mais disciplinada e comprometida com o esporte. Em especial a Sarah e Mariana, que foram meu alicerce para continuar firme na graduação, mesmo com todas as adversidades.

Aos meus amigos de longa data de Barueri, em especial a Leticia, que, apesar da distância física, sempre se fez presentes a cada ligação e mensagem enviada.

Ao meu orientador, professor Dr. Felipe Fernando Furlan, pelas reuniões, correções, ensinamentos e principalmente por me proporcionar autonomia para que eu pudesse concluir este trabalho.

Aos demais membros da banca, o professor convidado, Dr. Antonio Carlos Luperni Horta pelas correções do texto e entusiasmo com os resultados obtidos. E ao professor da disciplina, Dr. Ernesto Antonio Urquieta-Gonzalez pelas orientações gerais, correções e compreensão.

À UFSCar, que me proporcionou ensino de qualidade e diversos aprendizados que levo para a vida.

RESUMO

As mudanças energéticas se conectam com aspectos econômicos, tecnológicos, políticos e sociais. Assim, por exemplo, a emissão de poluentes advindos das fontes fósseis causa uma série de impactos ao meio ambiente e na vida das pessoas; o domínio geopolítico no fornecimento de fontes primárias gera dependência energética e flutuações nos preços de energia. Para contornar tais gargalos, alguns países no mundo têm adotado medidas que tornam suas matrizes energéticas mais renováveis e diversificadas. O presente trabalho analisou se o Brasil segue tais tendências internacionais. Neste sentido, construiu-se uma revisão bibliográfica dos principais conceitos relacionados à energia com o intuito de fornecer subsídios para as análises dos dados realizadas. Por sua vez, os dados de geração, consumo e preços de energia foram extraídos de sites, relatórios nacionais e internacionais. Ao final da pesquisa concluiu-se que o Brasil tem aumentado a participação das fontes de energias renováveis, especialmente da eólica e solar. Aliado a isto, os custos de geração de energia elétrica de ambas reduziram a partir de 2009 até atualmente, em 2020, e se tornaram competitivos com fontes fósseis como o gás natural e carvão mineral. No entanto, a matriz elétrica nacional ainda é muito dependente da hidrelétrica, e carece de maior diversificação para o suprimento da demanda interna de energia. Além disso, ao se comparar o preço da energia nacional com dos Estados Unidos (EUA), viu-se que pagamos mais caro, mais precisamente, são 13,40 contra 6,67 *cents* USD/kWh dos EUA na eletricidade industrial e 34,64 contra 9,90 *cents* USD/kWh no transporte. Esse é um dos fatores que impacta o crescimento tecnológico do país e causa perda de competitividade no âmbito internacional. Por fim, devido à disponibilidade de recursos naturais de combustíveis fósseis no mundo, a transição para uma matriz mais limpa deverá ser feita ativamente. Essa transformação garante não só a segurança do fornecimento energético, mas também o avanço tecnológico e social das esferas nacionais e mundiais.

Palavras-chave: Energia. Transição Energética. Comparação. Matriz Energética. Evolução.

ABSTRACT

Energetic transitions are connected with economic, technological, political and social aspects. Thus, for example, the emission of pollutants from fossil sources causes a series of impacts on the environment and on people's lives; the geopolitical dominance in the supply of primary sources generates energy dependence and fluctuations in energy prices. To circumvent such bottlenecks, some countries in the world have adopted measures that make their energy balance more renewable and diversified. The present work analyzed whether Brazil follows that international trends. In this sense, a bibliographic review of the main concepts related to energy was built in order to provide subsidies for the analysis of the data. In its turn, data on energy generation, consumption and prices were extracted from websites, national and international reports. At the end of the research, it was concluded that Brazil has increased the share of renewable energy sources, especially wind and solar. Allied to this, the electricity generation costs of both have reduced from 2009 to the present, in 2020, and have become competitive with fossil sources such as natural gas and mineral coal. However, the national electricity balance is still very dependent on hydroelectric power, and needs major diversification to supply domestic energy demand. In addition, when comparing the price of national energy with that of the United States (USA), it can be seen that Brazilian costs are higher, more precisely, it is 13.40 against 6.67 cents USD/kWh for industrial electricity and 34.64 against 9.90 cents USD/kWh in transport. This is one of the factors that impacts the country's technological growth and causes a loss of competitiveness at the international level. Finally, due to the availability of natural resources from fossil fuels in the world, the transition to a cleaner matrix will have to be made actively. This transformation guarantees not only the security of energy supply, but also the technological and social advancement of national and global spheres.

Keywords: Energy. Energetic Transition. Comparison. Energy matrix. Evolution.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Esquema dos tipos de carvão, composição e aplicações.	14
Figura 2.2 - (a) Esquema do ciclo de Rankine ideal, (b) Desvios do ciclo real de potência a vapor sobre o ciclo de Rankine ideal.	17
Figura 2.3 - Fluxo energético brasileiro em 2020.	19
Figura 2.4 - Emissões mundiais de CO ₂ (a) por ano e por setor, (b) por ano e por fonte de energia em 2019.	20
Figura 2.5 - Predição da participação das fontes da matriz elétrica em 2031.	23
Figura 4.1 - (a) Evolução da matriz energética mundial por fonte de energia, (b) Participação percentual das fontes na matriz energética mundial.	27
Figura 4.2 - Evolução da reserva provada de petróleo.	28
Figura 4.3 - Evolução do consumo de energia per capita por ano no mundo.	28
Figura 4.4 - Preço do petróleo versus produção	29
Figura 4.5 - Emissão anual de CO ₂ de combustíveis fósseis por região	30
Figura 4.6 - Evolução dos custo de energia nivelado das fontes de energia elétrica	31
Figura 4.7 - (a) Evolução da participação das fontes no consumo de energia do Brasil, (b) - Evolução da participação das fontes no consumo de energia do grupo G7	32
Figura 4.8 - Evolução da participação das fontes na matriz elétrica brasileira.	34
Figura 4.9 - Comércio de petróleo cru no ano de 2020, em milhões de tep.	35
Figura 4.10 - Disponibilidade de reserva e recurso de fontes primárias	37
Figura 4.11 - Evolução do fornecimento de energia total de algumas regiões no mundo.	38
Figura 4.12 - Evolução do consumo de energia per capita no mundo.	39
Figura 4.13 - IDH versus consumo per capita em alguns países.	40
Figura 4.14 - Participação do consumo de energia por setor e por região.	41
Figura 4.15 - Matriz energética de 2019 por fonte e por região.	41
Figura 4.16 - Participação monetária da tarifa de energia nos EUA	45
Figura 4.17 - Participação monetária da tarifa de energia no Brasil	46

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Densidade energética de combustíveis fósseis	11
Tabela 2.2 - Frações de petróleo e produtos obtidos	14
Tabela 2.3 - Life Cycle para cada fonte de energia. Emissões em gCO ₂ eq/kWh.....	21
Tabela 4.1 - Crescimento percentual da produção de energia por fontes mundial de 2010 a 2020.	31
Tabela 4.2 - Dependência externa de energia no Brasil.	42

Lista de Quadros

Quadro 4.1 - Principais produtores de fontes fósseis em 2020.	36
Quadro 4.2 - Preço de combustíveis fósseis em cents USD/kWh.....	43
Quadro 4.3 - Preço da eletricidade nos EUA e no Brasil em <i>cents</i> USD/kWh.....	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 ENERGIA E CONCEITOS.....	10
2.2 MATRIZ ENERGÉTICA.....	12
2.3 MEIO AMBIENTE	19
2.4 PLANOS NACIONAIS PARA O FUTURO DO SETOR ENERGÉTICO	22
3 METODOLOGIA.....	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1 TRANSIÇÕES ENERGÉTICAS NO MUNDO	26
4.2 ANÁLISE DE DADOS ENERGÉTICOS.....	34
4.3 PREÇO DE ENERGIA	42
5 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Segundo Smil (2017), o uso intenso de energia é razoavelmente recente na história da humanidade. A queima de combustíveis fósseis e a geração de eletricidade criaram uma nova forma de civilização de alto consumo energético, cuja expansão já abrangeu todo o planeta de maneiras diferentes. Em vista disso, a sociedade depende, para seu funcionamento, de um crescente fornecimento de energia.

Isso se traduz em uma dinâmica complexa de transporte, produção e consumo das diferentes fontes de energia, como petróleo, gás natural, energia nuclear, biomassa, hidrelétrica, e, mais recentemente pequenas, mas crescentes parcelas de novas fontes renováveis, em especial a solar e a eólica. Neste trabalho serão tratadas as tendências dessas mudanças na conjuntura energética comparando o cenário brasileiro com outras diversas regiões do mundo.

Alguns gargalos na dinâmica do setor energético permeiam a sociedade. Do ponto de vista ambiental, a emissão de gases poluentes devido à demanda crescente de energia tem sido a força motriz para a crise climática atual, que é um dos motivos da transição energética para fontes cada vez mais renováveis (IPCC, 2021). Além disso, implicações na geopolítica, ao centralizar o fornecimento de energia, gera grande dependência em outros países para garantir o próprio suprimento. Esse é um fator que afeta, por vezes, a dinâmica dos preços de energia. Ademais, existe a preocupação com a diversificação da matriz energética a fim de garantir o acesso de energia aos diversos setores de um país.

Assim, é urgente o processo de transição energética em direção à uma economia de baixo carbono e menor pegada ambiental. Tal processo ocorre associado à maior independência e segurança energética, que garante o desenvolvimento e a competitividade tecnológica e industrial de uma nação (PNE, 2020, p. 34). Em suma, as transições energéticas configuram um processo complexo e usualmente longo, envolvem diversas dimensões e trazem transformações amplas nos sistemas socioeconômicos e em suas relações com o meio ambiente.

Neste contexto, este trabalho apresenta a evolução da matriz energética brasileira frente à de países desenvolvidos. Objetiva-se comparar os fatores que influenciam a transição energética, além dos aspectos que moldam a estrutura do setor de energia tanto no Brasil quanto no mundo. Em vista disso, visa-se mostrar e discutir dados de custo energético, entender o comércio das fontes primárias, analisar o consumo per capita e a distribuição desse consumo entre os setores industrial, comercial, residencial, de transporte e outros consumidores finais.

Para interpretar essas questões, dados foram coletados a partir de pesquisas

bibliográficas em relatórios energéticos de diversas fontes, tanto nacionais quanto internacionais. Como resultado deste trabalho, espera-se montar um cenário da recente evolução da matriz energética brasileira, e finalizar com a discussão de como esta possivelmente impactará o setor industrial no futuro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção conceitua energia, suas formas e transformações. Neste âmbito, será discutida a definição de matriz energética e mencionadas suas principais fontes de energia, a saber: petróleo, gás natural, carvão mineral, energia nuclear, hidrelétrica, solar e eólica. Em seguida, discute-se o funcionamento de motores movidos à combustíveis nos automóveis, o processo produtivo de energia elétrica e a eficiência energética dos mesmos. Por fim, discute-se os problemas ambientais relacionados ao uso da energia, explicitando a urgência de uma matriz energética mais sustentável.

2.1 ENERGIA E CONCEITOS

De acordo com Çengel e Boles (2013), energia pode ser designada como a capacidade de causar alterações ou ainda segundo Borgnakke e Sonntag (2013), energia é a capacidade de produzir um efeito. A ciência que estuda a energia é chamada de termodinâmica, e pode englobar todos os conceitos da energia, suas formas e transformações.

É conveniente considerar as diversas formas de energia que constituem a energia total de um sistema em dois grupos: macroscópico e microscópico. A macroscópica está relacionada ao movimento e à influência de alguns efeitos externos como gravidade, magnetismo, eletricidade e tensão superficial. As formas microscópicas de energia são aquelas relacionadas à estrutura molecular de um sistema e ao grau de atividade molecular e são independentes de referenciais externos. A soma de todas as formas microscópicas de energia é chamada de energia interna: ela está relacionada à estrutura molecular e ao grau de atividade molecular (ÇENGEL; BOLES, 2013).

As transformações de todas essas formas seguem o princípio da conservação de energia, que é descrito pela primeira lei da termodinâmica. Ele afirma que durante uma interação a energia pode mudar de uma forma para outra, porém sua quantidade total é conservada. Já a segunda lei determina que à medida que avançamos nas cadeias de conversão, o potencial de trabalho útil diminui constantemente, sendo a entropia a medida associada a essa perda de energia útil (diminuição da qualidade, como acontecem com processos reais) (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Além disso, a energia pode ser transferida para ou de um sistema fechado (de massa fixa) de duas maneiras distintas: calor e trabalho. Para sistemas abertos a energia também pode

ser transferida por meio de um fluxo de massa. A transferência de energia causada por uma diferença de temperatura de ou para um sistema fechado é definida como calor, caso contrário, é chamada de trabalho. O trabalho é geralmente medido em kJ e se realizado por unidade de tempo é chamado de potência (kJ/s ou somente kW). O trabalho, assim como o calor são funções da trajetória, ou seja, suas magnitudes dependem da trajetória percorrida durante um processo, bem como dos estados inicial e final (ÇENGEL; BOLES, 2013).

É interessante notar que, ao longo deste trabalho, a energia elétrica será expressa em quilowatt-hora (kWh), que equivale a 3600 kJ. Outras duas taxas importantes a serem definidas são o poder calorífico e a densidade energética de um material, ambos medidos em MJ/kg. O poder calorífico do combustível, dado pela “quantidade de calor transferida da câmara durante a combustão ou reação a temperatura constante” (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013). A densidade energética é a quantidade de energia por unidade de massa ou volume que um recurso pode armazenar. Assim, quanto maior seu valor, mais energia pode ser armazenada ou transportada pela mesma quantidade de massa (SMIL, 2017). A Tabela 2.1 mostra os valores de combustíveis e suas respectivas unidades de densidade energética.

Tabela 2.1 - Densidade energética de combustíveis fósseis

Combustível	Densidade Energética
Carvão:	
Antracito	31-33 (MJ/kg)
Betuminoso	20-29 (MJ/kg)
Linhito	8-20 (MJ/kg)
Petróleo	42-44 (MJ/kg)
Gás Natural	29-39 (MJ/Nm ³) ¹

Elaboração própria. Fonte: Smil (2017. p. 227)

Ademais, a unidade de medida frequentemente utilizada para medir a energia primária é a tonelada de petróleo equivalente (tep), que corresponde ao calor liberado na combustão de 1 tonelada de petróleo bruto, funcionando como uma equivalência energética que permite somar a contribuição de várias fontes primárias, considerando a capacidade calorífica de cada uma delas. A unidade mais empregada para o petróleo é o barril (bbl), para o carvão usa-se a tonelada (ton), para mensurar o gás natural é usado (Nm³). Petróleo e gás natural podem ser expressos em barril de óleo equivalente (boe) (D’ALMEIDA, 2015).

Por fim, é necessário definir o conceito de eficiência energética, que é a diminuição do

¹ O termo Nm³ se refere ao metro cúbico normal, ou seja, o volume ocupado pelo gás nas condições padrões de temperatura e pressão.

uso de energia ao nível mínimo sem reduzir a rentabilidade de um recurso, em outras palavras, é uma expressão para o uso mais eficaz (ÇENGEL; BOLES, 2013). A título de exemplo, os principais combustíveis fósseis (carvão mineral, gás natural e petróleo) apresentam eficiência de 33% eficientes quando usados para geração de energia elétrica, e emitem altos níveis de CO₂ e óxidos nitrosos. A energia hidrelétrica tem eficiência cerca de 90%, mas está restrita a determinadas regiões e disponibilidade de água. O aquecimento doméstico por gás natural tem alta eficiência (95%) (DRAPCHO et al., 2008).

2.2 MATRIZ ENERGÉTICA

A energia que movimenta a indústria, o transporte, o comércio e demais setores do país recebe denominação de “Consumo Final”. A soma do consumo final e das perdas de energia é chamada de “Oferta Interna de Energia” – OIE, também denominada “Demanda Total de Energia” (*Total Primary Supply*). A estrutura da OIE é comumente chamada de Matriz Energética (REN, 2020, p. 28).

A matriz energética é constituída por diferentes fontes de energia. No cenário mundial no ano de 2019, as maiores participações são os combustíveis fósseis, que lideram o ranking nas três primeiras posições: petróleo (31,1%), carvão (27,0%) e gás natural (23,0%), seguido pela biomassa (9,3%) e as principais fontes de energia elétrica como nuclear (5,0%), hidráulica (2,6%), solar eólica e outras (2%) (IEA, 2019). Já no Brasil as porcentagens são 33,1% do petróleo, 19,1% derivados da cana, 12,6% hidráulica, 11,8% gás natural 8,9% lenha e carvão vegetal, 7,7% solar, eólica e outras renováveis 4,9% carvão mineral, 1,3% nuclear e o restantes 0,6% são outras não renováveis (BEN, 2020).

As outras fontes de energia possuem pouca relevância na contribuição energética mundial, portanto não serão mencionadas neste trabalho. Entretanto vale ressaltar a energia geotérmica, que é a energia térmica advinda do interior da Terra, e que é utilizada para produção de eletricidade, contribuindo com 0,38% na matriz energética mundial.

Dentre todas essas fontes, as energias primárias são aquelas disponíveis na natureza como o vento, a água do rio, o petróleo, gás natural, o carvão e o urânio. Já a energia final é a eletricidade, concedida após transformações energéticas e consumida pelo usuário final (EPE, s.d). Elas podem ser consideradas como renováveis e não renováveis. As renováveis podem ser repostas num curto período de tempo e se relacionam com processos naturais permanentes, além de não oferecer efeito danoso significativo sobre o meio ambiente, são exemplos: solar, eólica e biomassa. Por outro lado, as não renováveis se referem a recursos minerais que levam milhões de anos para se formar e que não podem ser repostos num tempo adequado ao seu uso.

Esses recursos emitem poluentes nocivos e/ou gases de efeito estufa no processo produtivo e no uso final. Os principais são: carvão, petróleo gás natural e urânio (ÇENGEL; BOLES, 2013).

2.2.1 Combustíveis Fósseis

Os combustíveis fósseis são recursos da natureza. Segundo Ritchie e Roser (2019), um recurso é a quantidade geológica de uma matéria-prima que existe em depósitos descobertos e não descobertos. A reserva é o a parte de um recurso que foi descoberta, tem um tamanho conhecido e pode ser extraída com lucro.

Eles são classificados em hidrocarbonetos sólidos (carvão), líquidos (petróleo) e gasosos (gás natural). As suas origens estão na transformação da radiação solar em energia química e se formaram há milhões de anos. O carvão é formado por ações de agentes bioquímicos, a alta temperatura e pressão sobre restos de vegetação. A formação de petróleo é decorrente do soterramento de plantas e animais marinhos a enormes pressões por milhões de anos. O grande uso desses combustíveis na sociedade se dá pela alta energia armazenada, sob a forma de energia química, evidenciada pela alta densidade energética (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013).

Em termos simples, os óleos brutos são classificados por densidade (grau API) e teor de enxofre. Os menos densos (mais leves, com maior grau API) geralmente têm maior parcela de hidrocarbonetos leves. Os mais densos requerem processamento adicional, sendo que alguns possuem alto teor de enxofre.

No processo de refino do petróleo cru, este entra na coluna de destilação fracionada próximo ao fundo. As frações pesadas - hidrocarbonetos com mais de 70 carbonos na cadeia - possuem maior ponto de ebulição e condensam em temperaturas maiores na parte inferior da coluna, enquanto as frações mais leves condensam a temperaturas mais baixas na parte superior. A Tabela 2.1 apresenta os principais produtos obtidos da destilação do petróleo, bem como as temperaturas, composição e ponto de ebulição de cada (KANOGLU et al., 2020).

O gás natural, por sua vez, é composto principalmente por metano (CH_4), com teores entre 60 e 98%. Quanto maior é a fração de metano, maior a densidade energética do gás. Além de metano, o gás natural também contém frações de etano, propano, butano, nitrogênio, oxigênio, hélio, CO_2 e outros gases. O gás natural pode ser encontrado associado ou livre de petróleo. Quando está dissolvido no petróleo, ele é utilizado para manter a pressão do reservatório, privilegiando a produção inicial do óleo. O gás natural é usado para geração de água quente e vapor em usinas para produção de eletricidade, em motores de combustão interna e em residências para cozimento. Seu transporte, em fase de gasosa, é feito por gasodutos entre

idades e países. E após ser liquefeito a cerca de -160°C usando tecnologias avançadas de refrigeração, o transporte se dá por grandes tanques isolados em navios. Esse gás é chamado de gás natural liquefeito (GNL) (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013).

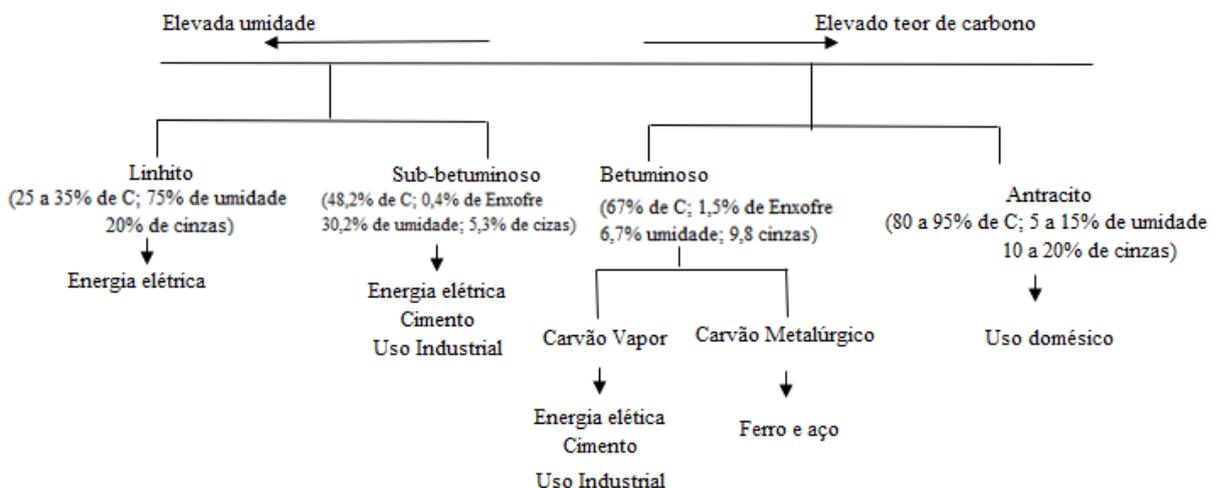
Tabela 2.2 - Frações de petróleo e produtos obtidos

Ponto de Ebulição ($^{\circ}\text{C}$)	Composição	Produtos
-	C70	Asfalto para estrada e coberturas
600	C50 – C70	Óleo combustível para embarcações, fábricas e termelétricas
-	C20 – C50	Óleos lubrificantes, ceras e polidores
270	C14 – C20	Combustível diesel para veículos
170	C10 – C16	Gasolina para aviação, parafina para iluminação
120	C5 – C10	Gasolina para veículos
70	C5 – C9	Produtos químicos, como plásticos
20	C1 – C4	Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)

Elaboração própria. Fonte: Borgnakke e Sonntag (2013, p. 546)

Por fim, o carvão mineral é composto principalmente por carbono, com frações de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cinzas. A Figura 2.1 resume os vários tipos de carvão, seus teores e principais aplicações.

Figura 2.1 - Esquema dos tipos de carvão, composição e aplicações.



Elaboração própria. Fonte: Kanoglu et al. (2020)

O teor de carbono depende do estágio de formação, quanto maior for o teor, combinado com baixas frações de água e impurezas, maior será sua densidade energética. O carvão é encontrado em todos os continentes, geralmente em regiões de baixas temperaturas ou clima temperado (KANOGLU et al., 2020).

2.2.2 Biocombustíveis

Biocombustíveis são materiais feitos a partir da biomassa, que por sua vez é uma energia primária não fóssil, pois é matéria orgânica de origem animal ou vegetal. Componente orgânico dos resíduos municipais e industriais de alimentos, como óleo de cozinha (usado para produção de biocombustível) também são considerados biomassa (KANOGLU et al., 2020).

A biomassa composta por resíduos de madeira (ou seja, pellets de madeira) pode ser queimada em combustão direta em caldeiras convencionais para gerar vapor ou água quente. Outros produtos importantes da biomassa são os biocombustíveis, que podem ser líquidos ou gasosos e são usados para transporte como combustível. Dois biocombustíveis mais comuns são o etanol e o biodiesel (KANOGLU et al., 2020). Outros produtos, que não serão discutidos neste trabalho, incluem metanol, óleo de pirólise, biogás, gás de produção e gás de síntese.

O etanol ou álcool etílico (C_2H_5OH) é obtido principalmente por meio da fermentação de açúcares e cereais. No Brasil, o etanol é produzido pela fermentação da cana-de-açúcar. É usado como combustível para veículos (etanol hidratado) e adicionado à gasolina (etanol anidro), com função de aumentar sua octanagem, permitindo maiores taxas de compressão e maiores eficiências para o motor do veículo (KANOGLU et al., 2020).

Ainda de acordo com Kanoglu et al. (2020), o biodiesel é constituído por misturas de ésteres etílicos ou metílicos produzidos através de um processo que combina óleos organicamente derivados com etanol ou metanol na presença de um catalisador. Fontes comuns de biodiesel incluem majoritariamente óleos vegetais novos ou usados e gorduras animais. Pode ser usado em motores de ignição por compressão como um único combustível ou pode ser adicionado ao diesel convencional. Como único combustível, chamado de B100, geralmente necessita do uso de material especial para peças como mangueiras e juntas.

2.2.3 Ciclo Otto

É importante ressaltar que os motores movidos à combustíveis nos automóveis funcionam em um ciclo, chamado de ciclo Otto (ignição por centelha), que é usado por combustível de baixa volatilidade, como a gasolina e o álcool. Nesses motores, a mistura de ar

e combustível é comprimida a uma temperatura abaixo da temperatura de autoignição do combustível, e o processo de combustão é iniciado pela centelha de uma vela de ignição (KANOGLU et al., 2020, p. 500). O ciclo Diesel (ignição por compressão) utiliza como combustível o óleo diesel. Nesses motores o ar é comprimido até uma temperatura acima da temperatura de autoignição do combustível, e a combustão é iniciada pelo contato à medida que o combustível é injetado nesse ar quente. Assim, a vela de ignição é substituída por um injetor de combustível nos motores a diesel. As eficiências térmicas dos motores reais de ignição por centelha variam de cerca de 25 até 30% e de motores a diesel entre 35 e 40%.

Os motores a diesel são em geral mais eficientes do que os motores de ignição por centelha, uma vez que operam com razões de compressão mais altas, além de queimarem o combustível mais completamente. Além disso possuem menor número de rotações por minuto e a razão entre a massa de ar e a de combustível é muito mais alta do que nos motores de ignição por centelha. Essas vantagens e os menores custos de combustível dos motores a diesel os tornam atraentes para aplicações que exigem quantidades relativamente grandes de potência, como os motores de locomotivas, as unidades de emergência para geração de potência, os grandes navios e os caminhões pesados (ÇENGEL; BOLES, 2013).

2.2.4 Produção de Energia Elétrica a Partir de Fontes Energéticas

A eletricidade é produzida em centrais termelétricas (usinas de potência a vapor), em usinas hidrelétricas e em parques eólicos. Em todas elas, o gerador é o dispositivo final responsável por converter energia mecânica (produzida pela rotação do eixo das pás de uma turbina) em energia elétrica. Dito isto, numa termelétrica os geradores são acoplados em máquinas térmicas que operam em um ciclo, conhecido como ciclo de Rankine (ÇENGEL; BOLES, 2013).

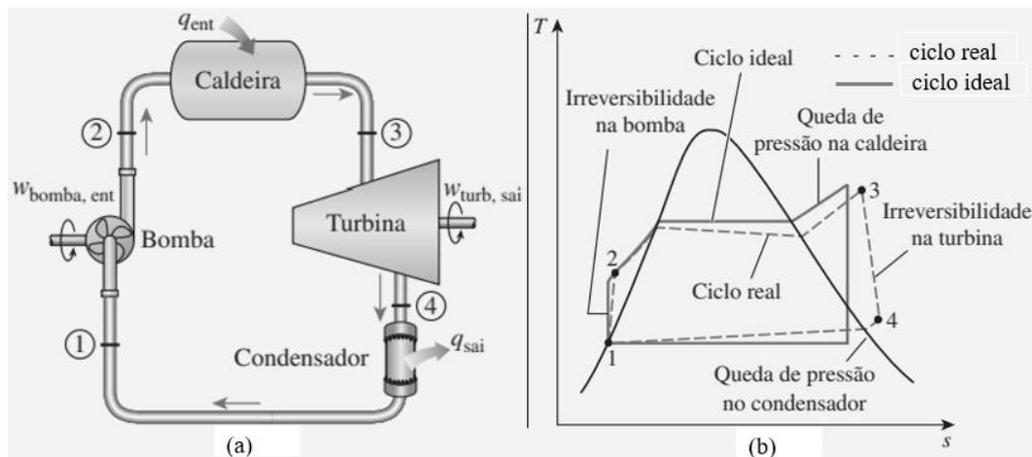
O esquema do ciclo de Rankine ideal é mostrado na Figura 2.2 (a), que consiste nos quatro processos seguintes: 1-2: compressão isentrópica em uma bomba, 2-3: fornecimento de calor a pressão constante em uma caldeira, 3-4: expansão isentrópica em uma turbina e 4-1: rejeição de calor a pressão constante em um condensador. Em maiores detalhes, o fluido circulante, neste caso a água, entra na bomba no estado 1 como líquido saturado e é comprimido de maneira isentrópica até a pressão de operação da caldeira no estado 2. A caldeira transfere calor originário de diferentes fontes para a água. A queima de combustíveis fósseis e biomassa permitem grande liberação de calor na caldeira. De forma equivalente, em usinas solares, os coletores de placas planas, coletores concentrados e heliostatos são dispositivos comuns que coletam radiação solar para conversão a calor útil. Na usina nuclear, o calor é produzido no

reator nuclear pela fissão nuclear dos átomos de urânio. A água então sai da caldeira como vapor superaquecido no estado 3. O vapor entra na turbina, na qual ele se expande de forma isentrópica e produz trabalho, girando o eixo conectado a um gerador elétrico. No estado 4, o vapor é condensado a pressão constante no condensador, rejeitando calor para um meio de resfriamento como um lago, um rio ou a atmosfera. E para completar o ciclo, a água deixa o condensador como líquido saturado e entra na bomba. No ciclo Rankine real, tanto a compressão quanto a expansão não são isoentalpicas, apresentando eficiência inferior a um. Da mesma forma, as etapas de aquecimento e resfriamento não são isobáricas, apresentando perda de carga nas duas etapas (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Em locais onde a água é escassa, o resfriamento nas usinas é realizado pelo ar, chamado de resfriamento seco. Várias usinas do mundo, incluindo algumas nos Estados Unidos, usam o resfriamento a ar para economizar água.

De acordo com Çengel e Boles (2013), o ciclo real de potência a vapor é diferente do ciclo de Rankine ideal. Isso acontece em virtude das irreversibilidades nos seus componentes, como atrito do fluido e perda de calor para vizinhança. O diagrama T-s da Figura 2.2 (b) ilustra os efeitos das irreversibilidades dos componentes sobre o ciclo de Rankine ideal.

Figura 2.2 - (a) Esquema do ciclo de Rankine ideal, (b) Desvios do ciclo real de potência a vapor sobre o ciclo de Rankine ideal.



Fonte: adaptado de Çengel e Boles (2013)

Por fim, as fontes de energia hidráulica e eólica não são produzidas a partir do ciclo de Rankine, uma vez que não são fontes que liberam calor.

Na usina hidrelétrica, grandes barragens são construídas no caminho de escoamento dos rios para coletar água. O volume do fluxo de água e a mudança na elevação ou queda de um

ponto para outro determinam a quantidade de energia disponível na água em movimento. Em geral, quanto maior o fluxo mais eletricidade uma usina hidrelétrica pode produzir. Essa energia potencial no ponto mais alto se transforma em energia cinética quando há queda da água, que movimenta as pás das turbinas que acionam os geradores, gerando energia elétrica. A água que passou por todos esses processos é redirecionada para o rio através do escoadouro (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Já na usina eólica, a turbina eólica transforma a energia cinética dos ventos em energia mecânica por meio do movimento de rotação das pás e, por meio do gerador, há conversão para energia elétrica (ÇENGEL; BOLES, 2013).

2.2.4.1 Sistema de rede elétrica

Após sua geração, a energia é transportada até o consumidor final a partir do Sistema Interligado Nacional (SIN). Inicialmente, as transmissoras de energia administram as linhas de transmissão. As distribuidoras de energia são responsáveis por conectarem suas linhas com a rede de transmissão e distribuir energia com menores voltagens para os consumidores residenciais e comerciais majoritariamente (PNE, 2020).

A energia elétrica no Brasil vem predominantemente de usinas hidrelétricas, seguida por termelétricas. A incorporação de energia eólica e solar na rede envolve algumas irregularidades e incertezas devido à mudança das condições eólicas e solares de forma horária, diária e sazonal. Isso requer um sistema de rede elétrica mais flexível do que o sistema convencional existente, a fim de acomodar o fornecimento inconsistente de eletricidade renovável. Os sistemas de armazenamento de energia também ajudam a lidar com as irregularidades da geração de energia eólica e solar BEN (2020).

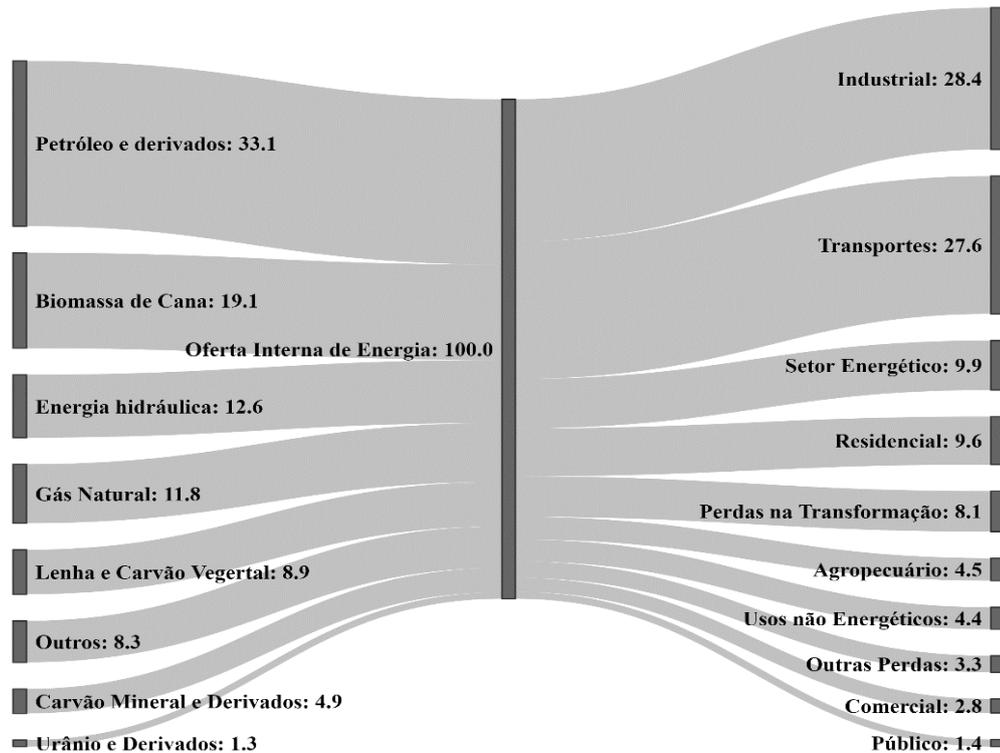
Os sistemas de transmissão e distribuição possuem perdas técnicas e não técnicas, onde técnicas são inerentes a qualquer circuito elétrico, ou seja, qualquer fio condutor possui resistência elétrica, que causará a transformação da passagem de corrente elétrica em calor, conhecido como efeito de Joule. Já as não técnicas são resultantes de furtos e problemas de medição. Todas essas perdas são cobradas e rateadas pelos consumidores finais (PNE, 2020).

2.2.4.2 Usos finais da energia

A energia possui diversos usos finais para a sociedade. A Figura 2.3 mostra o fluxo energético de oferta interna de energia no Brasil, ano base de 2020. Ela mostra as participações do suprimento de cada fonte de energia e as participações de consumo dos setores finais. O

setor que mais utiliza energia é o industrial, seguido de transporte, residencial e outros.

Figura 2.3 - Fluxo energético brasileiro em 2020.



Fonte: adaptado de BEN (2020)

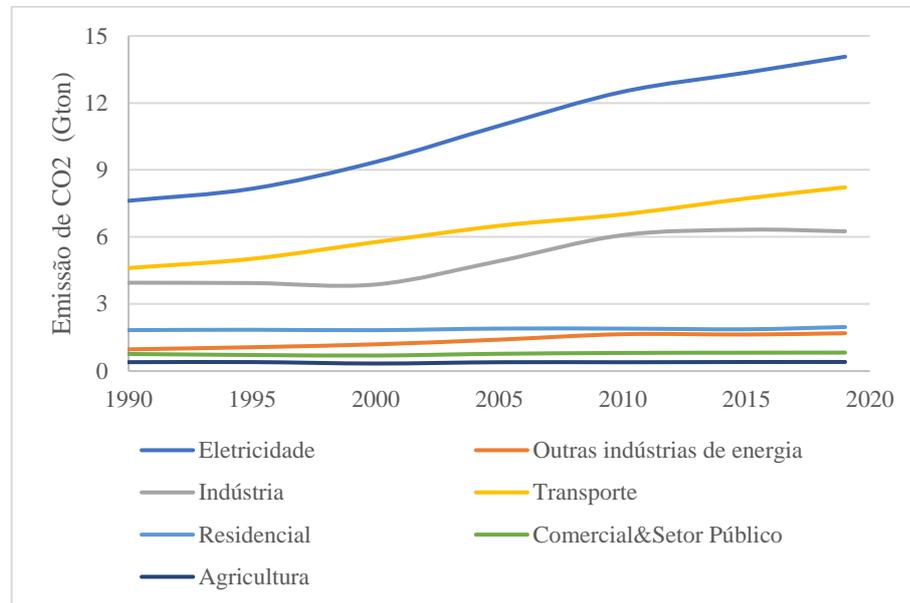
2.3 MEIO AMBIENTE

Segundo Kanoglu et al. (2020), o uso da energia final na sociedade envolve processos produtivos que afetam o meio ambiente de diversas maneiras. Os poluentes emitidos durante a queima de combustíveis fósseis são responsáveis pelo *smog*, chuva ácida, poluição do ar e pela atual crise climática. A poluição ambiental é uma séria ameaça à vegetação, à vida animal e à saúde humana.

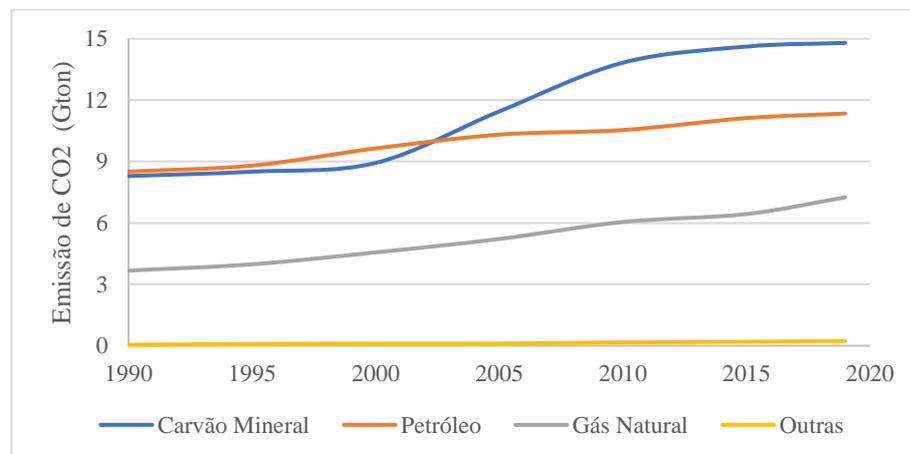
Os combustíveis fósseis, como o carvão, produtos derivados do petróleo e gás natural usados na geração de energia elétrica, transportes, construção e manufatura liberam diversos gases de efeito estufa na atmosfera. Dentre eles, o dióxido de carbono (CO₂) é o principal gás de efeito estufa que, ao ser liberado em excesso, contribui para o aquecimento global. A Figura 2.4(a) e 2,4(b) mostram, respectivamente a contribuição de emissões desse poluente por setor e por fontes de energia no mundo, por ano. A produção de eletricidade é o setor que mais libera CO₂ para o ambiente, seguida de transportes e indústria. Como esperado, as fontes de energia

com maior emissão de CO₂ são o carvão, seguido do petróleo e do gás natural (IEA, 2019)

Figura 2.4 - Emissões mundiais de CO₂ (a) por ano e por setor, (b) por ano e por fonte de energia em 2019.



(a)



(b)

Elaboração própria. Fonte: IEA (2019)

A crise climática não diz respeito somente ao aumento da temperatura média global. O desequilíbrio causado por esse aquecimento tem outras implicações, fazendo, por exemplo, lugares secos secarem mais, e os lugares úmidos ainda mais encharcados. Ela cria uma série de outras mudanças, pequenas e grandes, desde uma redução na quantidade de gelo do mar ártico, até uma perda de recifes de coral impulsionados pelos efeitos acidificantes do CO₂ nas águas oceânicas (ÇENGEL E BOLES, 2013).

Outro impacto da produção de energia é o efeito causado pelo uso da terra. A produção

de biocombustíveis compete com outros usos da terra, como por exemplo, culturas voltadas para alimentação humana e para a pecuária. A energia solar também pode competir com a agricultura por terra. Parques eólicos podem ser construídos em cima de fazendas ou mesmo paisagens naturais, mas há muito enfrentam oposição social sobre questões como ruído e impactos visuais na paisagem (HILL, 2013).

Além disso, existem danos causados ao meio ambiente pela utilização de qualquer fonte. Esses danos podem ser medidos ao se realizar o método da Análise do Ciclo de Vida, ou *Life Cycle Analysis* (LCA), que consiste em “avaliar o impacto ambiental de um produto ao longo de seu ciclo de vida, abrangendo extração e processamento das matérias-primas, fabricação, distribuição, uso, reciclagem e disposição final” (HILL, 2013). O valor é geralmente dado em emissões de gCO₂eq/kWh. A Tabela 2.3 mostra esses valores para algumas fontes.

Tabela 2.3 - Life Cycle para cada fonte de energia. Emissões em gCO₂eq/kWh.

Carvão	675–1689
Petróleo	510–1170
Gás natural	290–930
Bioenergia²	14–650
Geotérmica	6–79
Hidrelétrica	3–75
Nuclear	4–110
Solar fotovoltaica	18–180
Eólica	7–56

Elaboração própria. Fonte: Bruckner (2014)

A variação depende de uma série de fatores. No carvão mineral, as termelétricas tradicionais às modernas; gás natural possuem menores emissões nas que usam ciclo combinado; na construção de hidrelétrica formam-se regiões alagadas onde ocorre a decomposição da matéria orgânica, que acarreta na emissão de CO₂eq³; a energia nuclear, possui menos emissões, mas o descarte do material radioativo causa maior impacto ambiental; as análises de ciclo de vida de biomassa são focadas na agricultura/produção e processamento silvícola, que depende da variedade de agricultura, silvicultura e fatores de gestão (HILL, 2013).

Para contornar esses problemas e estimular uma transição energética sustentável no mundo, em 2015, o Acordo de Paris, formula o objetivo de limitar o aquecimento global neste

² Fonte: Amponsah et al, (2014)

³ CO₂eq é uma medida que expressa a quantidade de gases de efeito estufa em termos equivalentes da quantidade de dióxido de carbono (IPCC, 2021).

século a bem abaixo de 2°C. Para isso, são necessárias ações rápidas nos setores de energia, transporte, infraestrutura e agricultura, ao mesmo tempo levando em consideração as necessidades desses setores de atender às demandas de uma população humana crescente (IPCC, 2021).

Entre as outras iniciativas de organismos internacionais com papel relevante na transição energética mundial destacam-se a: (i) *International Maritime Organization* (IMO), para limitar emissão de dióxido de enxofre e carbono no transporte marítimo, e as (ii) metas da *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (CORSIA), para atingimento da neutralidade das emissões no setor de transporte aéreo internacional.

Há também no âmbito nacional, um conjunto de políticas, programas, iniciativas e ações que se relacionam ao tema da transição energética e, conseqüentemente, uma matriz mais sustentável.

Alguns deles são: Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC): compromisso de reduzir, em 2030, as emissões de GEE em 43% (anos de 2005 como referência); Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), que busca incrementar a produção e a participação dos biocombustíveis na matriz de combustíveis do Brasil, colaborar com previsibilidade para a participação competitiva dos diferentes biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis e cooperar para o atendimento aos compromissos do Brasil no âmbito do Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

Por fim, o marco legal da Micro e Mini Geração Distribuída (MMGD), que objetiva o livre acesso do consumidor às redes das distribuidoras, a segurança jurídica e regulatória e a alocação dos custos de uso da rede e dos encargos previstos na legislação do Setor Elétrico (PDE, 2020).

2.4 PLANOS NACIONAIS PARA O FUTURO DO SETOR ENERGÉTICO

Segundo o Plano Nacional de Energia 2050 (2020), a nova transição energética terá como base a eletrificação, sobretudo renovável, com maior eficiência energética. No Brasil, os biocombustíveis terão destaques, principalmente nos mercados em que o processo de eletrificação enfrentar maiores desafios. A ampliação da competitividade das baterias terá papel fundamental nessa nova transição, garantindo maior confiabilidade do sistema no setor elétrico. Espera-se maior participação do gás natural, do etanol e da eletricidade em detrimento das demais fontes de energia.

A entrada de novos agentes no setor de gás natural, por exemplo utilizando novos terminais de GNL e o aumento de investimentos no setor, podem alterar a dinâmica do mercado

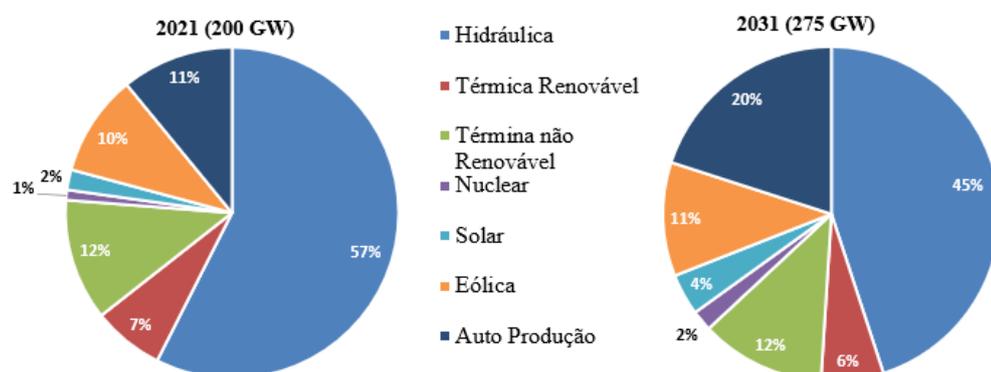
regional de gás natural e o acesso do mercado doméstico ao mercado de GNL. Essas mudanças são esperadas principalmente advindas da iniciativa da Nova lei do Gás, que tem como objetivo aumentar a concorrência no mercado de gás natural, atrair novos investidores e trazer mais competitividade ao setor. No quesito dos biocombustíveis, o RenovaBio somada ao estabelecimento do Programa Combustível do Futuro corrobora os desdobramentos positivos e o fortalecimento do setor (PNE, 2020).

A disponibilidade dos recursos energéticos nacionais, as elevadas tarifas finais de eletricidade e um modelo de compensação de créditos favorável tornaram o investimento em geração própria bastante rentável no Brasil. Isso levou não apenas consumidores residenciais, mas também produtores rurais, redes varejistas, bancos e indústrias a investirem em sistemas de MMGD nas modalidades local ou remoto. Com isso, os cenários variam o incremento desta fonte entre 27 a 47 GW de capacidade instalada até 2031 (PDE, 2020).

Estima-se que a produção nacional de petróleo atinja, em 2031, 5,2 milhões de barris por dia, aproximadamente 80% superior ao valor registrado em 2020, consolidando o Brasil na sua condição de exportador de petróleo, embora continue importando líquido dos principais derivados durante todo o horizonte do estudo. Entretanto, a evolução da demanda mundial de petróleo é afetada por políticas públicas, por tecnologias e pelas preferências dos consumidores. Isso pressupõe uma valorização relativa de combustíveis mais limpos (PDE, 2020).

Avalia-se que haverá maior diversificação da matriz elétrica, com a participação da hidrelétrica sendo compensada pelo crescimento da capacidade instalada das fontes eólica e solar. A Figura 2.5 contém a previsão da composição da produção de energia elétrica por fonte em 2031. A fonte hidráulica continuará sendo a fonte de maior contribuição.

Figura 2.5 - Predição da participação das fontes da matriz elétrica em 2031.



Fonte: adaptado de PDE (2021)

Por fim, um grande problema com as fontes de energia renovável é a incapacidade de armazenar a energia produzida de forma viável. Este não é um problema com a biomassa, uma vez que os biocombustíveis, como etanol e biodiesel, podem ser armazenados e utilizados a qualquer momento. No entanto, a eletricidade produzida a partir de sistemas solares, hidrelétricas, usinas geotérmicas e turbinas eólicas não pode ser armazenada para uso posterior. As baterias não são uma opção viável na tecnologia atual devido à sua capacidade limitada. Uma possível solução para este problema é a produção de hidrogênio a partir de eletricidade renovável pela eletrólise da água. Uma vez produzido, o hidrogênio pode ser armazenado e usado a qualquer momento (PDE, 2020).

No Brasil, em 2020, foram produzidas cerca de 325 mil toneladas de hidrogênio puro em refinarias nacionais (PDE, 2021, p. 336). Embora o refino de petróleo seja um importante produtor de hidrogênio no país, destaca-se que no cenário atual, esse volume é utilizado para consumo interno nos processos de hidrotreatamento. Em 2031, projeta-se um consumo da ordem de 375 mil toneladas.

3 METODOLOGIA

Este trabalho utilizou como método a pesquisa documental, utilizando informações de relatórios, bancos de dados do setor de energia, bem como sites com estudos técnicos de outras áreas do conhecimento além da engenharia química, em vista do caráter transdisciplinar do tema.

De forma geral, a pesquisa se dividiu em duas partes. Na primeira parte, fez-se a análise quantitativa dos dados. Depois, passou-se a uma análise mais qualitativa e subjetiva, avaliando fatores que impactaram aos dados coletados.

As fontes de referências usadas foram nacionais e internacionais. No âmbito nacional, foram utilizados relatórios e dados do Balanço Nacional de Energia, da Resenha Energética Brasileira e da Empresa de Pesquisa Energética. As principais fontes internacionais foram relatórios e dados do *Intergovernmental Panel on Climate Change, Energy Information and Administration, International Energy Agency, e EIA, IEA* e dados de *Statistical Review of World Energy*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O objetivo desta seção é mostrar dados e discutir os resultados obtidos na pesquisa do trabalho. Inicia-se com o panorama geral das transições energéticas ocorridas nos últimos 100 anos na história da humanidade, mostra-se a evolução das participações das fontes de energia e o que levou a matriz energética até o cenário atual, cada vez mais renovável. Compara-se as tendências energéticas que o mundo tem seguido com o Brasil e com países desenvolvidos. Posteriormente, apresenta-se os fluxos do comércio das fontes de energias, explicitando dados de consumo, produção, recursos e reservas de energia mostrando a disponibilidade e dependência de energia no Brasil. Finaliza-se com a análise dos preços de energia justificando se, e porquê o custo energético nacional é alto, e como ele impacta a competitividade da indústria nacional.

4.1 TRANSIÇÕES ENERGÉTICAS NO MUNDO

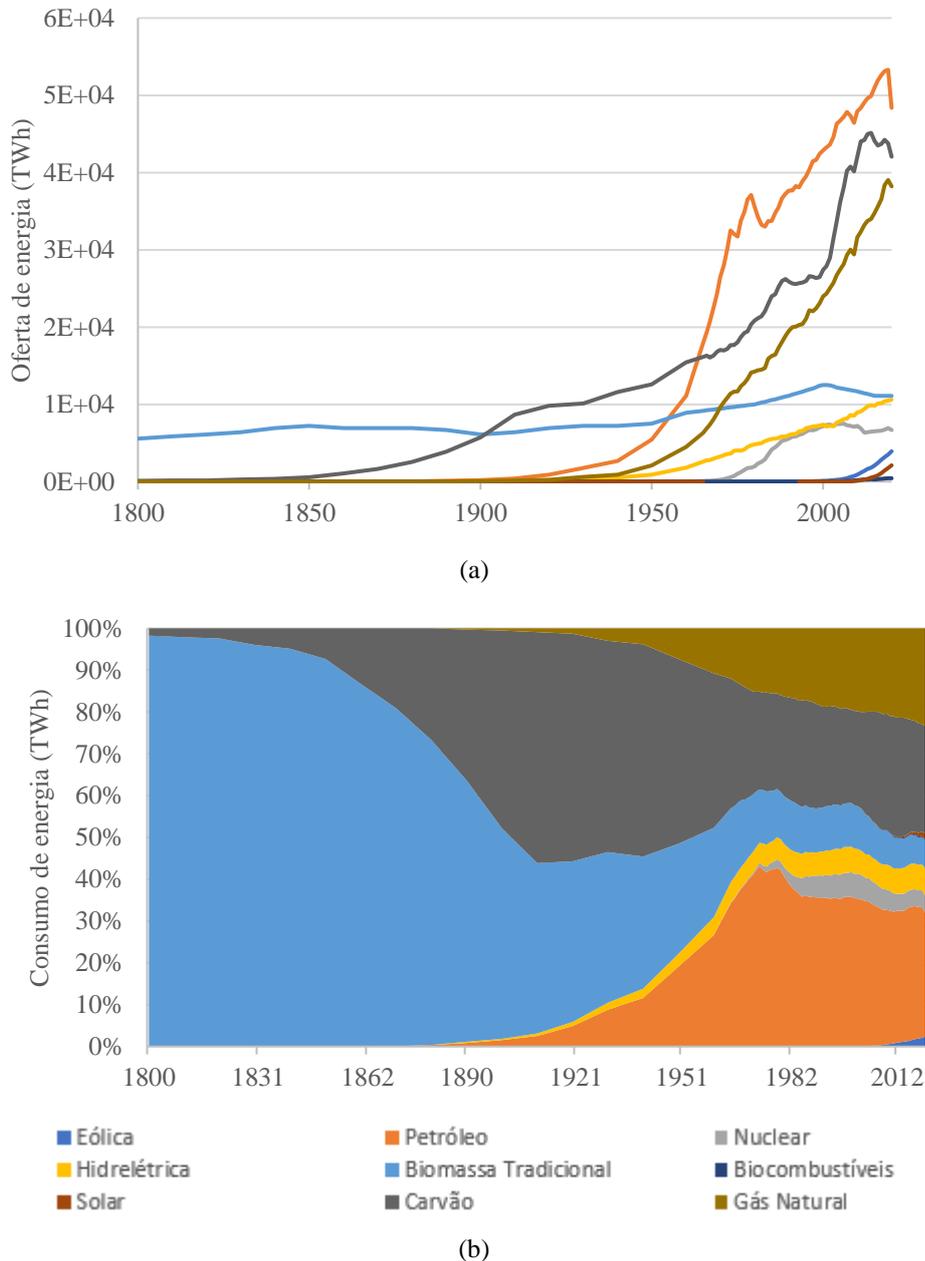
Transição energética se relaciona com as mudanças expressivas na composição da matriz energética primária mundial que acontecem de tempos em tempos. A duração das mudanças estão cada vez menores nas sucessivas eras de energia e com ritmo acelerado (PNE, 2020). Isto pode ser observado na Figura 4.1 (a), que apresenta a evolução da matriz energética mundial por fonte de energia ao longo dos anos, desde 1800 até 2020. Já a Figura 4.1(b) mostra a participação percentual de cada fonte apontando a grande dependência que ainda se tem com as fontes fósseis.

É possível notar, pela na Figura 4.1 (a) que, a partir da Revolução Industrial, ocorrida na Inglaterra (século XVIII), quando a máquina a vapor passou a ser utilizada na produção manufatureira, houve uso intensivo de carvão mineral como forma de energia. Outrora uma matriz energética dominada pela biomassa, desde o início dessas mudanças, essencialmente todas as energias primárias aumentaram. Iniciou-se com a utilização do carvão mineral para a produção de energia elétrica, depois petróleo, gás natural, usina hidrelétrica, a fissão nuclear em meados da década de 1950, e mais tarde a inserção das fontes da energia eólica e solar (células fotovoltaicas) (SMILL, 2004).

É natural o questionamento sobre quais fatores propiciaram mudanças na matriz energética. A disponibilidade da fonte é um fator que estimula o uso intensivo de energia. Como um exemplo, a Figura 4.2 apresenta os dados de reserva provada de petróleo ao longo do tempo,

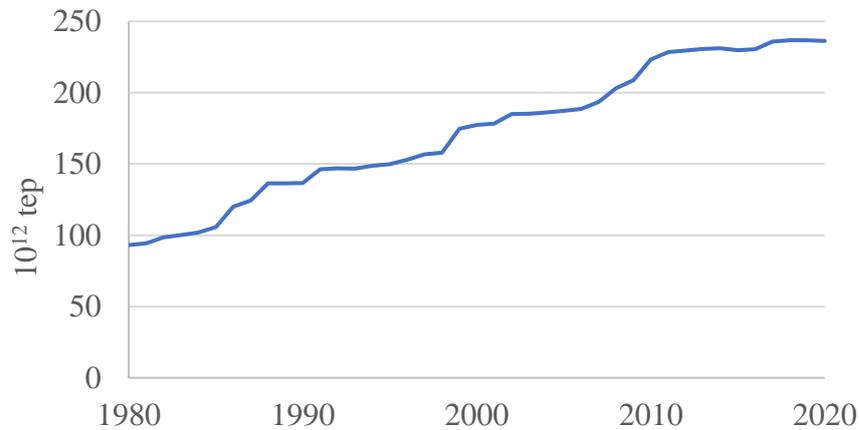
a partir de 1980. É possível reparar que houve crescimento na sua disponibilidade, o que colaborou para que essa fonte fosse cada vez mais explorada.

Figura 4.1 - (a) Evolução da matriz energética mundial por fonte de energia, (b) Participação percentual das fontes na matriz energética mundial.⁴



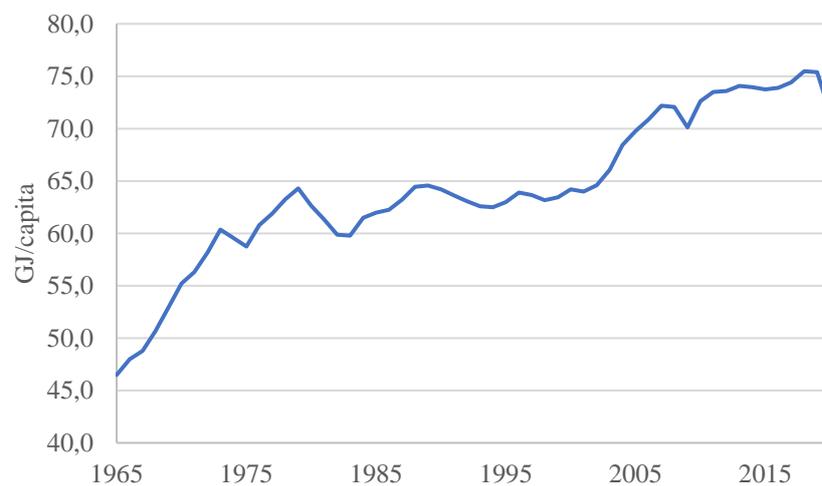
Elaboração própria. Fonte: *Statistical Review of World Energy* (2021) e Smil (2017)

⁴ Todos os dados anteriores ao ano de 1965 são provenientes de Smil (2017). Todos os dados de 1965 em diante, com exceção da biomassa tradicional, são provenientes de *Statistical Review of World Energy* (2021). As estimativas de biomassa tradicional da Smil só estão disponíveis até 2015. Para os anos de 2016 em diante, assumiu-se um nível semelhante de consumo de biomassa tradicional. Isso está aproximadamente em linha com as tendências recentes da biomassa tradicional dos dados de Smil. Foi usado fator de conversão de 277,778 para converter de exajoules (EJ) para TWh.

Figura 4.2 - Evolução da reserva provada de petróleo.

Elaboração própria. Fonte: *Statistical Review of World Energy* (2021)

Com toda essa reserva de energia, também foi observado o grande aumento do uso de energia per capita por ano no mundo, evidenciado pela Figura 4.3. Nota-se também que a taxa de crescimento está estritamente correlacionada com a disponibilidade de petróleo. Sem o uso dos combustíveis fósseis, possivelmente não haveria como o mundo ter suportado todo esse crescimento populacional.

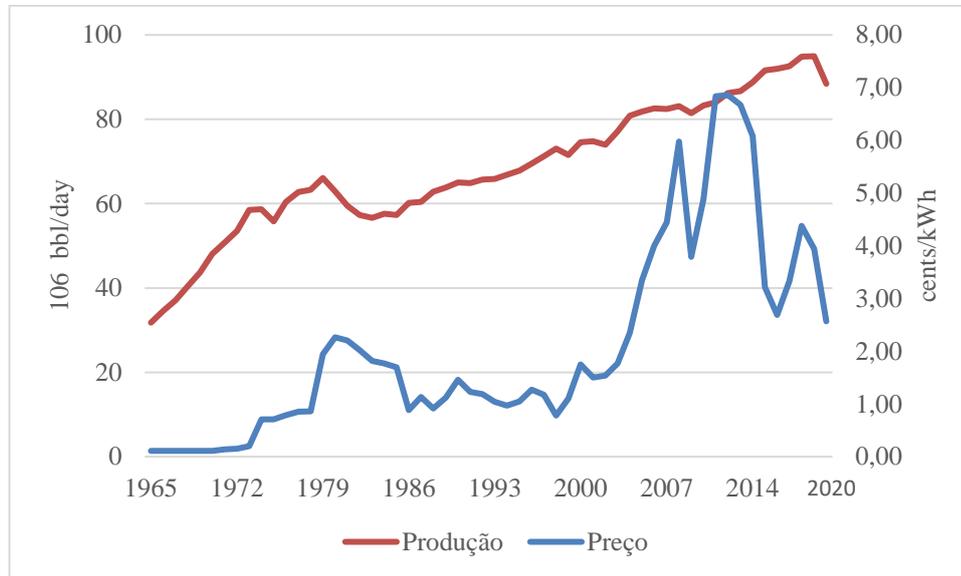
Figura 4.3 - Evolução do consumo de energia per capita por ano no mundo.

Elaboração própria. Fonte: *Statistical Review of World Energy* (2021)

Outro fator importante a ser analisado é o preço das fontes e seu impacto na transição energética. A título de exemplo, é mostrado na Figura 4.4, a relação entre o preço do petróleo e sua produção. Nota-se que entre 1930 e 1973 o preço do petróleo foi aproximadamente constante, um elemento fundamental para a expansão da produção. Esse período passou por

duas guerras mundiais e a grande crise econômica da década de 1930, mas nunca houve um período de crescimento tão rápido e generalizado de produção.

Figura 4.4 - Preço do petróleo versus produção



Elaboração própria. Fonte: *Statistical Review of World Energy* (2021)

A partir da década de 1970, houveram grandes discontinuidades na relação entre preço e produção do petróleo, e desde então, algumas instabilidades no final do século 19. As causas foram devidas às grandes turbulências entre a dinâmica de produção e demanda de petróleo. O evento conhecido como crise do petróleo de 1970 ocorreu depois que a OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) elevou os preços do petróleo. Em decorrência dessa crise, foi lançado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) no Brasil, cujo objetivo maior era a redução da dependência nacional em relação ao petróleo importado. Este biocombustível tornou-se altamente competitivo em relação à gasolina, tanto no mercado interno, quanto no externo (LEITE; CORTEZ).

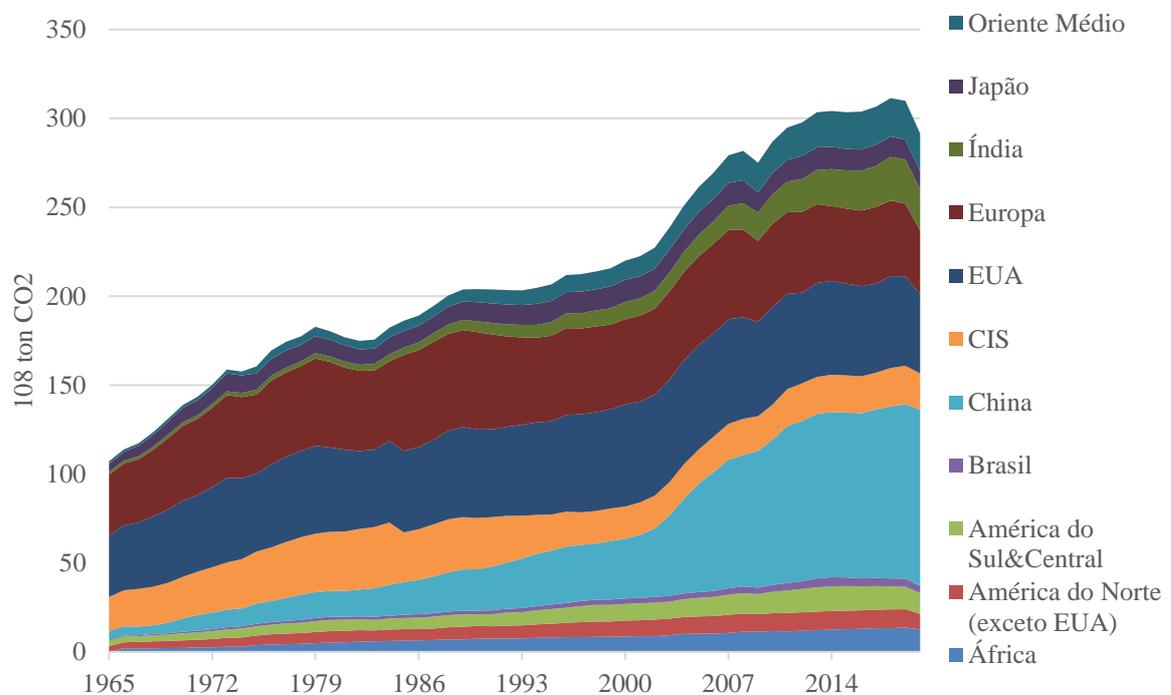
Durante a década de 1990 os preços baixos do petróleo estabilizados proporcionaram outro período de crescimento, que terminou apenas em 2008 com a pior recessão pós-Segunda Guerra Mundial, seguido por uma fraca recuperação. Já Em 2009 o mundo passava por uma recuperação do preço do petróleo. Nos tempos mais atuais, as rebeliões políticas ocorridas a partir de 2010 no Oriente Médio, conhecidas por “Primavera Árabe”, também foram motivos para o aumento dos preços do petróleo. Até mesmo a pandemia Covid-19 alteraram os preços, em 2020 (IEA, 2021).

Fica clara a complexidade de prever os preços do petróleo. Causas políticas, sociais,

ambientais e tecnológicas podem alterá-lo grandemente.

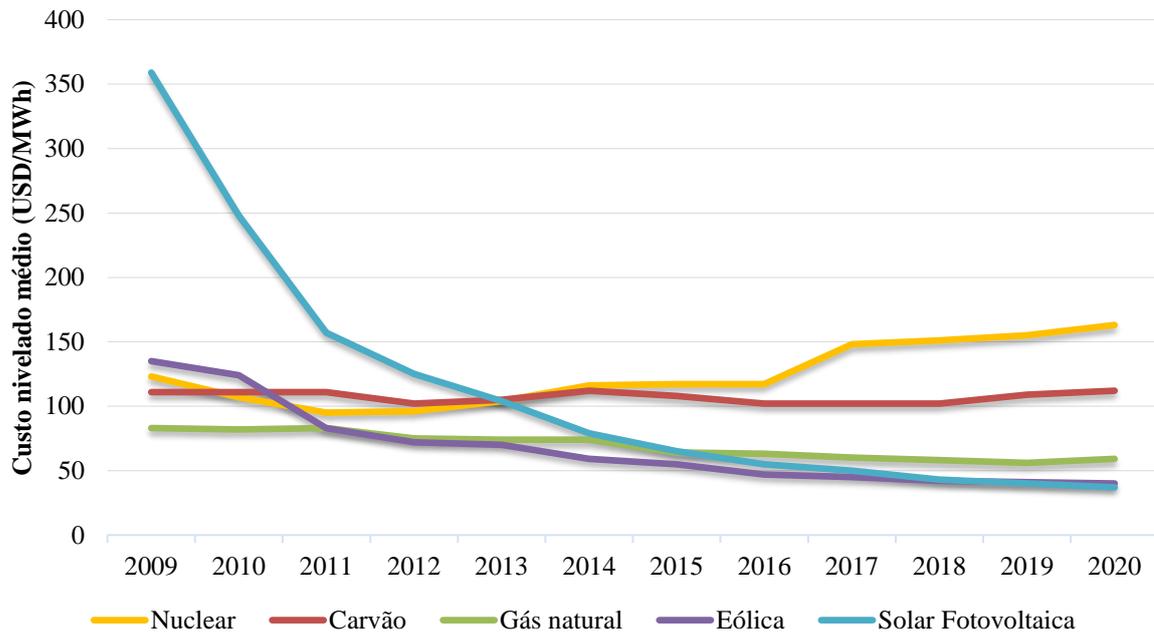
Todas essas crises sócio-políticas mostram que existe uma dependência do fornecimento de combustíveis fósseis, controlado por algumas regiões. Concomitantemente a isso, surge a preocupação com os impactos ambientais e sociais causados pela liberação de gases de efeito estufa na atmosfera. Na Figura 4.5 é possível ver o aumento quase exponencial da emissão anual de CO₂ na atmosfera da China a partir de 2000 até 2019. Verifica-se que o aumento é dominado por alguns poucos países em rápida expansão econômica, à medida que todas as mudanças na conjuntura energética foram acontecendo. Desta forma, é necessário traçar estratégias a fim de superar esses gargalos no uso da energia.

Figura 4.5 - Emissão anual de CO₂ de combustíveis fósseis por região



Elaboração própria. Fonte: *Statistical Review of World Energy* (2021)

Neste contexto, as novas energias renováveis (solar e eólica) surgem como uma alternativa. Aliadas à queda dos custos para a produção de eletricidade na última década, confirmada pela Figura 4.6, as renováveis têm se mostrado uma ótima escolha tanto para a dependência quanto para a crise climática. Cabe ressaltar que nos últimos anos, o custo da eletricidade advinda da energia solar caiu a uma taxa surpreendente, repetidamente, e, a partir de 2016, se tornou competitivo com o custo de usinas a gás.

Figura 4.6 - Evolução dos custo de energia nivelado⁵ das fontes de energia elétrica

Elaboração Própria. Fonte: Lazard (2020, p.8)

Além disso, a Tabela 4.1 mostra o crescimento percentual da produção de energia das fontes da matriz mundial e brasileira no ano de 2020 em relação a 2010. É evidente como o aumento da produção de energia a partir da fonte solar e eólica supera das fontes não renováveis.

Tabela 4.1 - Crescimento percentual da produção de energia por fontes mundial de 2010 a 2020.

Fonte de Energia	Mundo	Brasil
Biocombustíveis	139,54%	35,00%
Carvão	5,81%	-17,59%
Eólica	359,27%	2519,44%
Gás Natural	22,31%	59,30%
Geotérmica e outras renováveis	73,85%	64,01%
Hidrelétrica	25,06%	-1,61%
Nuclear	-2,47%	5,32%
Petróleo	6,12%	42,38%
Solar	2441,36%	7858,69% (2015 a 2020) ⁶

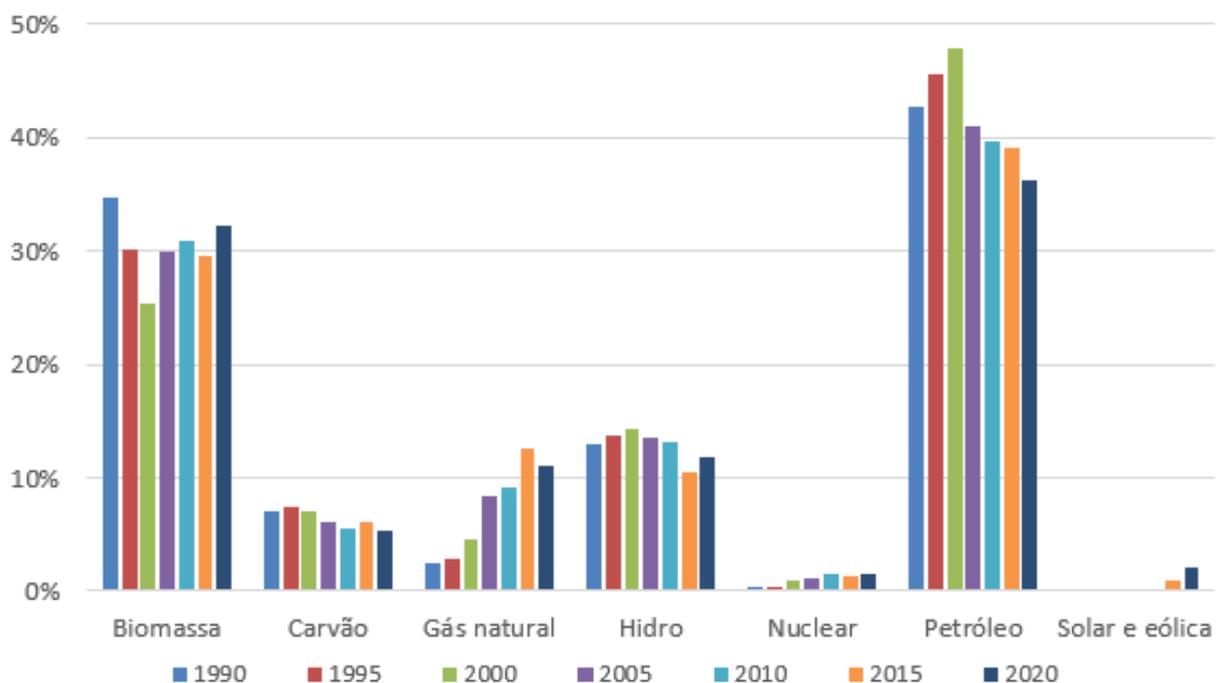
Elaboração própria. Fonte: *Statistical Review of World Energy* (2021)

⁵Custo Nivelado de Energia ou Levelized Cost of Energy (LCOE) é uma métrica que compara os custos de diferentes métodos de geração de eletricidade, custo médio ao longo do tempo, combinação de custos fixos e variáveis, que englobam preço da energia, manutenção, instalação da usina energética.

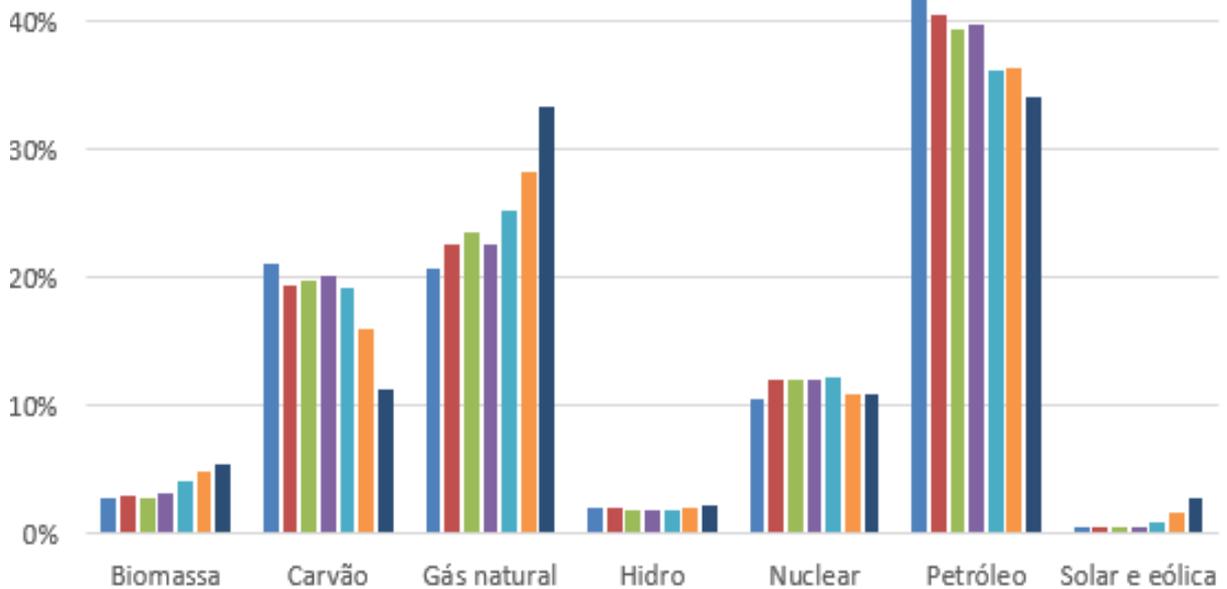
⁶Dados de geração de energia solar somente está disponível a partir de 2015 no Brasil

Podemos agora voltar a análise para comparar a participação de cada fonte no consumo de energia do Brasil com a dos países mais industrializados do mundo atualmente, o chamado G7 (Alemanha, Canadá, EUA, França, Itália, Japão e Reino Unido). Pela Figura 4.7(a), que mostra a participação das fontes no Brasil, e a Figura 4.7(b), que apresenta as fontes do G7, é possível concluir quatro pontos. O primeiro, é sobre a queda da participação do carvão e do petróleo entre 2015 e 2020 em ambos os grupos. O segundo é o aumento da porcentagem das fontes de energias de biomassa (biocombustíveis), nuclear, hidráulica, solar e eólica, ainda que as participações dessas últimas sejam pequenas em relação ao total, mas com grande potencial para escalar. Em terceiro, o fato de o Brasil possuir a matriz energética muito mais renovável (impactadas pelas fontes de biomassa e hidráulica) que os países do G7. E por fim, apesar da Tabela 4.1 mostrar que a produção de petróleo brasileira tenha aumentado em 42,38%, pela Figura 4.7(a) pode-se notar que o consumo dessa fonte diminuiu. Isso se explica, pois a produção de petróleo é destinada para exportação.

Figura 4.7 - (a) Evolução da participação das fontes no consumo de energia do Brasil, (b) - Evolução da participação das fontes no consumo de energia do grupo G7



(a)

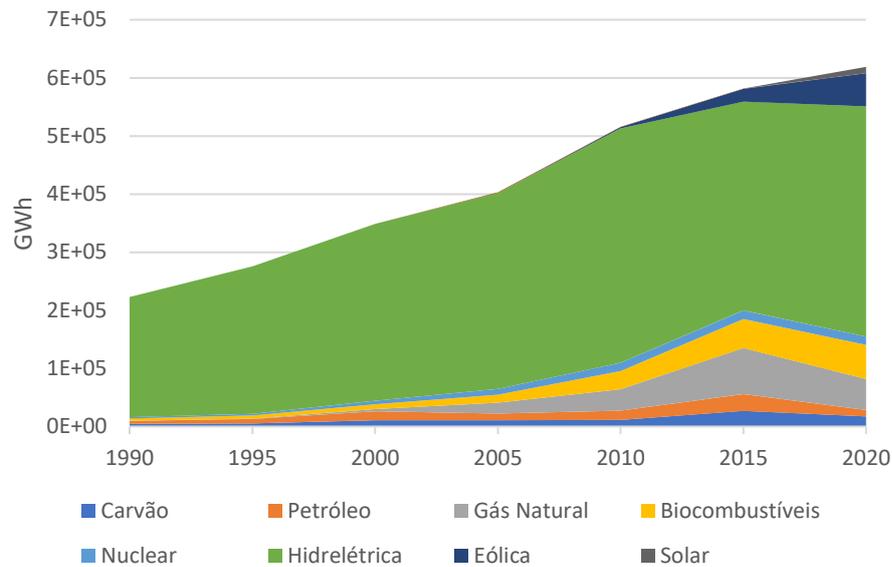


(b)

Elaboração própria. Fonte: IEA (2019)

Em suma, as Matrizes Energéticas nacionais e do grupo G7 apresentaram significativas alterações estruturais. Os incrementos mais relevantes são relacionados às fontes solar e eólica e o decréscimo mais acentuado do petróleo quando se compara os dois gráficos. Entretanto, a participação do gás natural nos países do G7 apresentou um aumento bastante significativo. Apesar de menos expressivo, no Brasil também está ocorrendo esse aumento. Ademais, espera-se que a Nova Lei do Gás leve a participação do gás natural a aumentar entre a década de 2021 a 2031.

Voltando o olhar à matriz elétrica nacional. Algo importante a se notar na Figura 4.8, é que a capacidade de geração e a diversificação das fontes de energia na matriz elétrica têm aumentado nos últimos anos. Entretanto, as hidrelétricas ainda são a fonte principal para o suprimento de eletricidade nacional. Por consequência disso, a escassez hídrica ocorrida em 2021 foi ainda mais crítica do que o “apagão” sofrido em 2001. Percebe-se que a segurança no abastecimento de energia elétrica depende, em grande parte, das vazões afluentes e do armazenamento de energia nos reservatórios das usinas hidrelétricas que, por sua vez, estão relacionados à conjuntura climática e ao aumento dos usos da água. Isto posto, se torna evidente a importância de investir na diversificação da matriz a partir da inserção de fontes renováveis além das hidrelétricas, como eólica, biomassa e solar fotovoltaica, complementada pela expansão das termelétricas a gás natural para garantir o suprimento da matriz elétrica nacional.

Figura 4.8 - Evolução da participação das fontes na matriz elétrica brasileira.

Elaboração própria. Fonte: IEA (2019)

4.2 ANÁLISE DE DADOS ENERGÉTICOS

Esta seção expõe e analisa os dados do setor energético no que tange à comercialização das fontes de energia, consumo, produção, apresentar as reservas e recursos de fontes naturais. Finaliza-se abordando sobre os preços de energia sua influência na competitividade da indústria nacional.

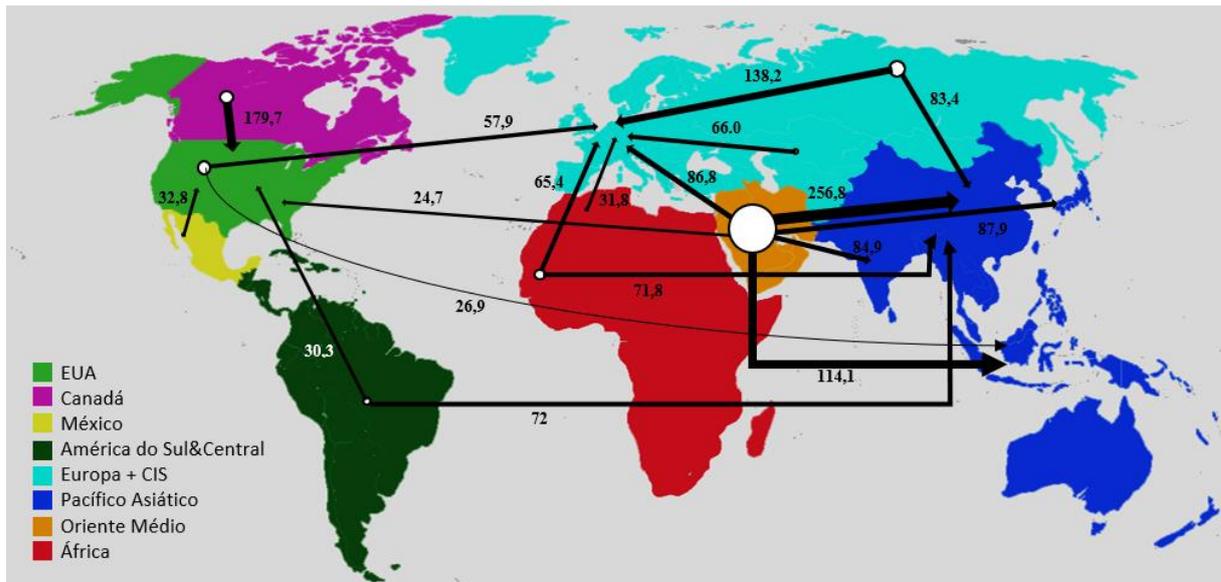
4.2.1 Comércio Entre as Fontes de Energia

A Figura 4.9 mostra dados de exportação e importação de petróleo por país. A análise do comércio de energia entre as regiões do mundo ajuda a entender a dependência de países que importam energia para o suprimento da população. Constata-se que uma grande parte do fluxo de energia advém da exportação da Arábia Saudita para diversas partes do mundo, principalmente para China, Índia, Japão, outros países da Ásia, Europa e EUA. Ademais, há uma grande exportação da Rússia, especialmente para a Europa. Finalmente, nota-se que a China aparece como a maior potência importadora, mostrando seu grande avanço energético nos últimos anos.

Segundo o *Statistical Review of World Energy* (2021a, p. 45), em 2020, 704 milhões de tep de gás foram comercializados por oleodutos e 454 milhões de tep de gás liquefeito transportado por navios. Assim como acontece com o petróleo, existe uma grande dependência da Europa com o gás natural da Rússia (156 milhões de tep), maior exportadora do mundo.

Em 2020 o Brasil, por sua vez, exportou 70,89 e importou 8,68 milhões de tep de petróleo. O Brasil também importou gás da Bolívia via o oleoduto Gasbol (5,8 milhões de tep), 2,6 milhões de tep de gás liquefeito dos EUA e 0,37 milhões de tep de gás liquefeito de Trindade e Tobago. De forma geral, o Brasil é um exportador de petróleo e importador de gás natural.

Figura 4.9 - Comércio de petróleo cru no ano de 2020, em milhões de tep



Elaboração própria. Fonte: *Statistical Review of World Energy* (2021a, p. 32)

4.2.2 Produção de Petróleo, Gás Natural e Carvão Mineral

Em 2020, 4165,1 milhões de toneladas de petróleo foram produzidos. Já a produção de gás natural possui a dinâmica um pouco diferente, do total de 3589,7 milhões de tep. Em relação ao carvão, foi um total de 3797,6 milhões de tep de produção no mundo (apenas combustíveis sólidos comerciais, ou seja, carvão betuminoso e antracite (carvão duro), e linhito e sub-betuminoso e outros combustíveis sólidos comerciais). O Quadro 4.1 resume os principais produtores de petróleo, gás natural e carvão mineral. Duas observações a serem feitas. Primeira, os EUA não aparecem como grandes exportadores na Figura 4.9, apesar de serem grandes produtores de óleo e gás natural, pois a maior parte de sua produção é consumida internamente. Segunda, a economia Chinesa é dependente do carvão, pois mesmo sendo a principal produtora deste produto, ainda é sua maior importadora. Do ponto de vista da transição energética, a China está na contramão da diminuição do uso de fontes fósseis.

Quadro 4.1 - Principais produtores de fontes fósseis em 2020.

Petróleo (milhões ton)		Gás Natural (bilhões Nm ³)		Carvão (EJ)	
EUA	712,7	EUA	914,6	China	80,91
Rússia	524,4	Rússia	638,5	Indonésia	13,88
Arábia Saudita	519,6	Irã	250,8	Índia	12,68
Canadá	252,2	China	194,0	Austrália	12,42
Iraque	202,0	Catar	171,3	EUA	10,71
Brasil	159,2	Brasil	23,9	Brasil	0,09

Elaboração própria. Fonte: *Statistical Review of World Energy* (2021).

4.2.3 Recursos e Reservas de Fontes Energéticas

Vamos ficar sem combustíveis fósseis? A resposta informa se uma transição para as renováveis será obrigatória, ou se teremos que escolher ativamente fazer essa mudança.

Segundo o relatório *Statistical Review of World Energy* (2021a), em 2020 o mundo tinha um total de 244,2 mil milhões de toneladas de reserva de petróleo. Isso garante ao mundo a razão reserva/produção de 53,5 anos com as reservas atuais. Interessante ressaltar que, o Oriente médio possui quase metade de toda reserva provada (48,3%), 17,2% na Arábia Saudita. Destaca-se também a Venezuela, com 17,5%, Canadá com 9,7% e Rússia com 6,2%. A América central e do Sul com 18,7%, sendo Brasil com apenas 0,7% da participação total.

No cenário nacional, em mar, as maiores reservas de petróleo estavam em São Paulo 64,2% e no Rio de Janeiro 34,5% do total. Em terra, as maiores reservas provadas de petróleo estavam em Sergipe 27,3%, na Bahia 26% e no Rio Grande do Norte 22,5% do total (REN, 2020).

Gás natural possui 188,1 trilhões Nm³ no total, garantindo 48,8 anos de suprimento se esse nível de produção permanecer constante. A maior reserva de gás natural provada está na Rússia, com 19,9% do total, os países do Oriente Médio com 40,3% tendo Irã e Catar como maiores detentores de gás, 17,1% e 13,1% respectivamente. Brasil com 0,2%.

As maiores reservas brasileiras de gás natural em mar estão localizadas em São Paulo e no Rio de Janeiro, com, respectivamente, 72% e 23,7% do total. Em terra, o Amazonas apresenta as maiores reservas provadas, 48,8% do total, seguido pelo Maranhão, com 30,6% do total (REN, 2020).

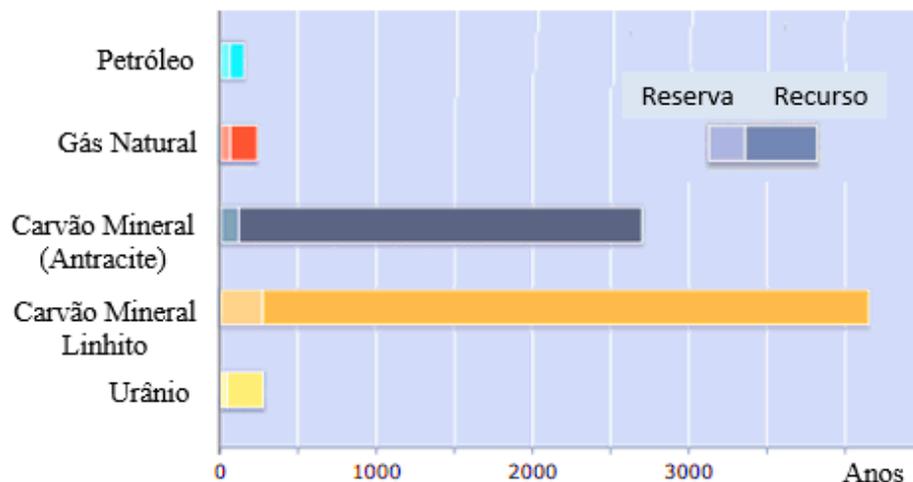
Já o carvão mineral possui dinâmica diferente. A região com maior reserva é o Pacífico asiático, com 42,8% do total, enquanto os EUA possuem 23,2%. O total de 1.074.108 milhões de toneladas garante 139 anos de suprimento no mundo. A metade das reservas é de carvão betuminoso e antracito, sendo as demais de linhito e sub betuminoso (CANO, 2017). Como

exceções, a África do Sul e a Índia possuem quantidades expressivas de carvões de alto teor de carbono, com mais de 90%. Na Rússia, cerca de 70% das reservas são de carvões de baixo teor de carbono. O carvão nacional corresponde a 0,6% do mundo, e predominam os de baixo teor de carbono, no entanto são considerados recursos praticamente inexplorados, e a estagnação do investimento em pesquisas geológicas detalhadas é resultado da baixa atratividade econômica deste minério.

Por fim, os principais recursos de urânio estão na Austrália (28%), Cazaquistão (15%), Canadá (9%), Rússia (8%), Namíbia (7%), África do Sul (5%), Brasil (5%), Nigéria (4%), China (4%), Ucrânia (2%) e EUA (1%). A distribuição global dos recursos identificados se dá entre 16 países (providos de 95% do total global de recursos identificada), que são grandes produtores de urânio ou têm planos significativos de crescimento da capacidade de geração nuclear (URANIUM 2020: RESOURCES, PRODUCTION AND DEMAND, 2020, p. 16).

A duração das reservas provadas e os recursos estimados das fontes primárias é mostrada a partir de uma representação gráfica, que fornece uma percepção de quanto tempo o mundo será suprido por essas fontes energéticas (Figura 4.10). Observa-se que carvão estará disponível por muito tempo no futuro.

Figura 4.10 - Disponibilidade de reserva e recurso de fontes primárias



Fonte: adaptado de Aldruleit et al. (2012)

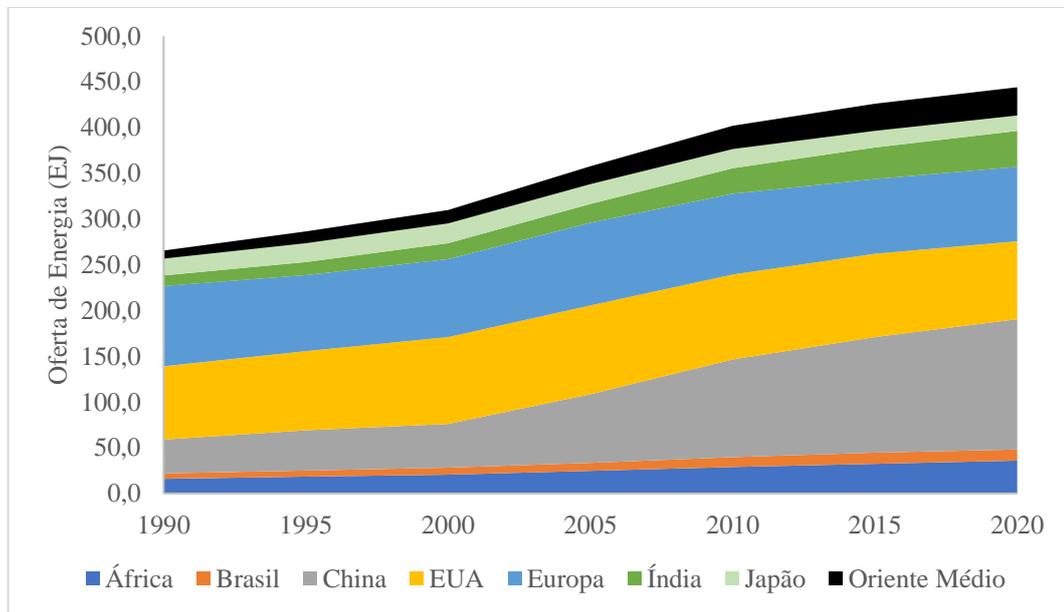
Desta forma o esgotamento no futuro próximo pode ser excluído (mesmo no caso do petróleo bruto), pois declínios relacionados à produção nas reservas convencionais em todo o mundo foram compensados pela conversão de recursos em reservas. Além do mais, as inovações técnicas estão aumentando a possibilidade de exploração dos recursos. Mas até quando os volumes de recursos naturais poderão ser disponibilizados para suprir o que o mundo

consume hoje? Não existe uma resposta simples, mas o desprovisionamento de oferta – associada a saltos nos preços –, precisa ser incorporado ao planejamento futuro, uma vez que essa escassez não se deve tanto a complicações de disponibilidade geológica, mas majoritariamente a desastres naturais imprevistos, investimentos inadequados ou crises político-econômicas.

4.2.4 Consumo de Energia Total e Per Capita

A Figura 4.11 ilustra o fornecimento de energia em algumas regiões do mundo se deu ao longo do período de 1990 e 2020.

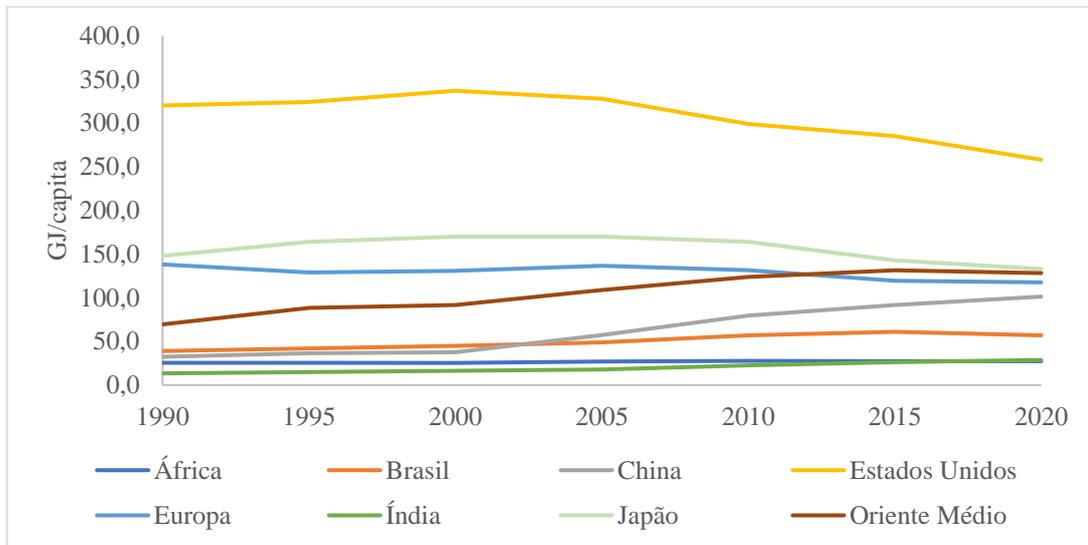
Figura 4.11 - Evolução do fornecimento de energia total de algumas regiões no mundo.



Elaboração própria. Fonte: IEA (2019)

Existem alguns pontos para notar sobre esta distribuição. Observa-se que o consumo nos EUA e na Europa quase não variou nas últimas décadas, os últimos anos, de fato, mostraram leves declínios. O Japão também tem diminuído o consumo ainda que marginalmente. A China, por outro lado, usa mais energia do que a Europa e os EUA, e seu uso de energia triplicou de 2000 para 2020.

Agora, tirando o crescimento populacional e olhando para o uso de energia per capita durante o mesmo período pela Figura 4.12, é possível reparar que o declínio do uso de energia dos EUA parece maior. E que o uso de energia per capita da Europa tem sido extraordinariamente constante.

Figura 4.12 - Evolução do consumo de energia per capita no mundo.

Elaboração própria. Fonte: IEA (2019)

O uso de energia em uma base per capita do mundo está crescendo muito lentamente. O Oriente Médio tem se intensificado constantemente, a transição da China é repentina: a partir deste século, é o uso de energia per capita que mais subiu em um ritmo excepcional. África e Índia ambos têm uso de energia per capita pequeno e muda muito lentamente, mas a Índia está crescendo um pouco mais rápido e já passou a África.

Enquanto que países desenvolvidos diminuíram o consumo. Nos EUA, por exemplo, alguns dos motivos foram a adoção de sistemas elétricos mais eficientes, aumento na eficiência média de combustível dos veículos, incentivos financeiros para investimentos em eficiência energética e redução na produção intensiva de energia em manufaturas (USE OF ENERGY EXPLAINED, 2021).

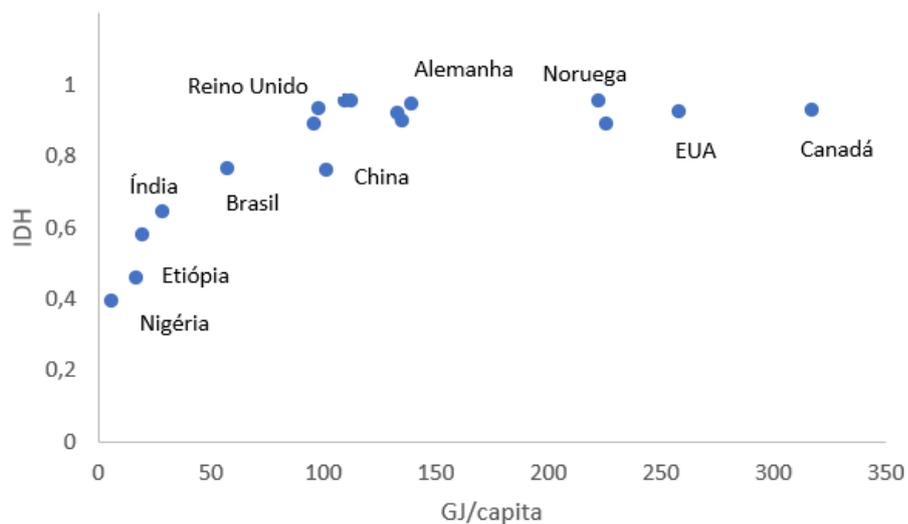
De acordo com Smil (2004), as relações entre produção econômica e uso de energia não são óbvias. Pelos dados mostrados de produção, reservas e recursos entende-se que a posse de recursos energéticos abundantes não tem sido garantia de sucesso econômico nacional, muito menos de acesso à maiores quantidades de energia, assim como a ausência desses recursos não tem sido nenhum obstáculo para alcançar uma prosperidade econômica como o Japão, a Coreia do Sul e diversos países da Europa.

A Figura 4.13 deixa nítido que a qualidade de vida se baseia no nível adequado de uso energético. É possível inferir que os países ricos e desenvolvidos não precisam atingir níveis muito altos de consumo per capita para desfrutar de uma boa qualidade de vida- medida pelo índice de Desenvolvimento Humano (IDH).

Pela Figura 4.13 vemos que existe uma forte correlação entre o IDH e o consumo de

energia para valores abaixo de 100 GJ/capita. O IDH acima de 0,9 precisa de nada menos que aproximadamente 100 GJ/capita para uma nação ser considerada desenvolvida, vide Reino Unido. Os EUA consomem praticamente o dobro da energia primária per capita do que os países mais ricos da União Europeia, mas seria desapropriado sugerir que as vidas americanas são duas vezes melhores. Na realidade, os EUA estão atrás da Europa em uma ampla gama de variáveis de qualidade de vida, incluindo maiores taxas de mortalidade infantil, mais homicídios, menor alfabetização científica e menos tempo livre.

Figura 4.13 - IDH versus consumo per capita em alguns países



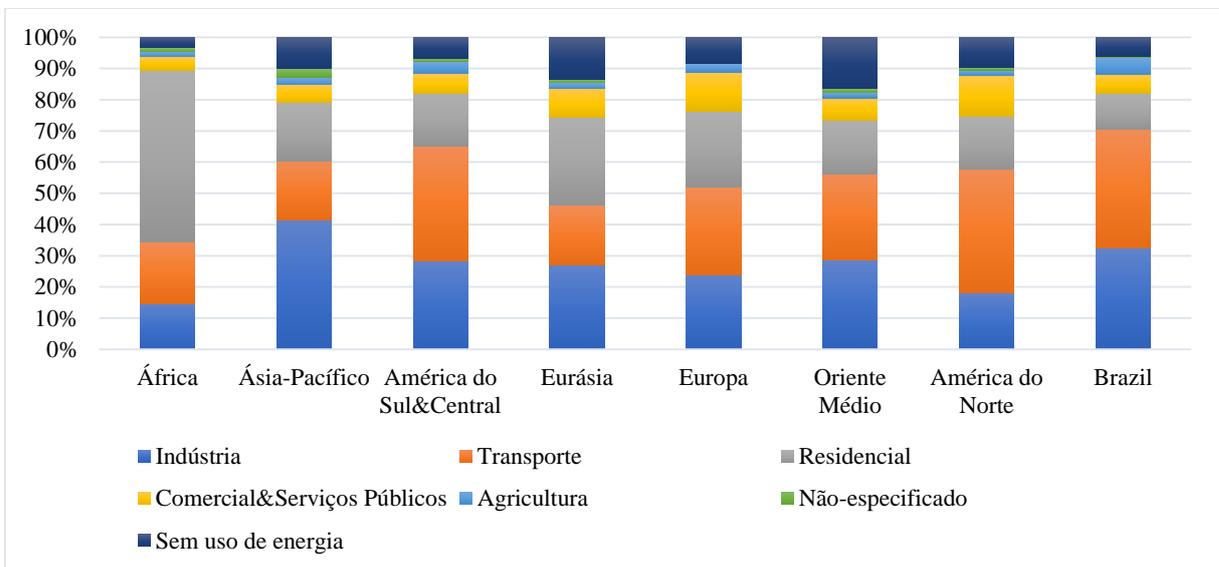
Elaboração própria. Fonte: IEA (2019) e Relatório Do Desenvolvimento Humano (2020)

A fim de continuar a comparação do uso da energia entre as diferentes regiões do mundo, faz necessária a análise da participação do consumo de energia por setor, aqui dividido em indústria, comércio e serviços públicos, residência, transporte, agricultura e outros. O que mais chama atenção na Figura 4.14 é a participação da energia nos países da África como majoritariamente para uso residencial, seguido pelo transporte e indústria. A região do Pacífico asiático possui uma cultura forte de industrialização, onde concentra a maior parte do uso de sua energia total. Na Europa, observa-se que o consumo é bastante equilibrado, com maior participação no transporte. No cenário brasileiro a concentração se dá principalmente no setor de transporte e industrial, além do consumo considerável no setor da agricultura. Essas dinâmicas mostram como uma possível variação no preço da energia pode impactar cada um dos setores, por exemplo.

Quando analisada a participação de cada fonte por região da matriz energética de 2019, dada pela Figura 4.15 entende-se a alta dependência por carvão no Pacífico asiático, em especial

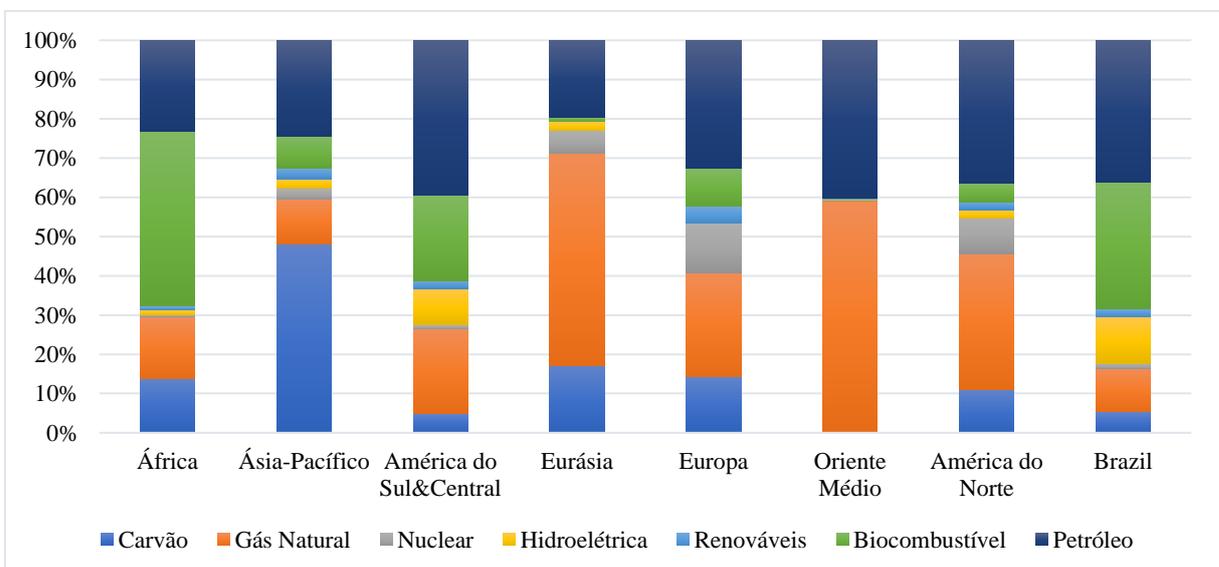
na China e Índia, e nota-se a dependência da África com a biomassa tradicional (pessoas coletando madeira para queimar e utilizar para cozimento, não a moderna como a utilizada para produção de etanol brasileiro). Nota-se a considerável contribuição hidrelétrica na América Central, e como os países da Eurásia e Oriente Médio têm fornecimento dependentes do gás natural. Todas as regiões apresentadas ainda possuem grande participação de petróleo na matriz energética, acima de aproximadamente 20%. Por fim, é importante destacar que em 2020 a participação energética do setor industrial brasileiro ultrapassou a do setor de transporte.

Figura 4.14 - Participação do consumo de energia por setor e por região.



Elaboração própria Fonte: IEA (2019)

Figura 4.15 - Matriz energética de 2019 por fonte e por região.



Elaboração própria. Fonte: IEA (2019)

4.2.5 Dependência de Energia

A dependência de energia de um país pode ser mensurada pela subtração de sua demanda pela sua produção. Sendo assim, o resultado positivo implica em energia que deverá ser importada a fim de suprir a demanda energética. Diante de todos os dados apresentados, concluiu-se a alta dependência dos principais países importadores de energia, neste contexto é possível examinar com mais detalhes a dependência nacional das principais fontes de energia primária, como mostra o Tabela 4.2. Ao todo, com o passar dos anos, o Brasil tem diminuído sua dependência, evidenciado pelo valor negativo. O grande responsável por esse resultado é o petróleo, uma vez que a produção nacional vem aumentando, sua participação na matriz energética diminuindo mesmo que marginalmente e sua exportação aumentado. A importação de carvão vem diminuindo consistentemente desde 2015 (de 41,4% em 2015 para 27,3% em 2020), assim como a sua participação na matriz energética. O gás natural também sofre queda na importação desde 2014, ainda que lentamente, por fim, a eletricidade possui fraco comércio, uma vez que a maior parte é produzida e consumida internamente. De toda forma, o Brasil importa energia elétrica do Paraguai (STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2021a).

Tabela 4.2 - Dependência externa de energia no Brasil⁷.

Identificação	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Total	7,8	10,5	14,2	12,4	7,3	2,2	0,4	-1,3	-4,9	-10,5
Petróleo	-1,0	5,8	11,8	2,3	-11,8	-21,9	-26,7	-33,4	-40,8	-56,2
Gás Natural	36,7	38,0	42,3	43,5	41,4	33,4	26,7	29,4	26,4	27,3
Carvão Mineral	80,0	70,8	71,1	75,0	76,1	77,1	83,3	85,4	79,2	74,6
Eletricidade	6,3	6,8	6,6	5,4	5,6	6,6	5,8	5,5	3,8	3,8

Elaboração própria. Fonte: *Statistical Review of World Energy* (2021a, p. 104)

4.3 PREÇO DE ENERGIA

Pelo Quadro 4.2 é possível ver como os preços variam ao redor do mundo do petróleo, gás natural e carvão mineral. Nota-se que os preços do petróleo não variam muito em todo o mundo, isso porque o mercado global de transporte de petróleo é grande e eficiente, uma vez que é um fluido de alta densidade tornando o processo de movimentação descomplicado. Desta

⁷ Variação percentual: (OIE – Produção) /OIE. Números negativos indicam que houve exportação de energia.

forma é viável a concorrência de preços do petróleo de diferentes lugares. O mesmo não ocorre para o gás natural, que possui algumas variações ao redor do mundo, justamente por suas limitações de transporte, não é tão simples quanto do petróleo, então há mais espaço para variação de preço (NATURAL GAS EXPLAINED: FACTORS AFFECTING NATURAL GAS PRICES, 2021).

Como visto, o preço do gás natural que o Brasil paga é caro em relação a outros lugares. Reduzir a diferença de preço do gás natural no Brasil em relação ao preço médio medido pelo Henry Hub, de 484% para 200% é uma meta apresentada no Mapa Estratégico da Indústria (2018).

Quadro 4.2 - Preço de combustíveis fósseis em cents USD/kWh.

Petróleo⁸		Carvão Mineral		Gás natural	
Dubai	2,54	Noroeste da Europa	0,49	Japão	2,67
Brent	2,51	EUA Central	0,42	Alemanha	1,39
Nigéria	2,54	Japão	0,68	Reino Unido	1,17
West Texas	2,35	Qinhuangdao (China)	0,81	Holanda	1,05
Brasil	2,76	Brasil	0,79	EUA	0,68
				Canadá	0,54
				Brasil	4,03

Elaboração própria. Fonte: *Statistical Review of World Energy* (2021) e BEN (2021)

O Quadro 4.3 compara o preço que se paga pela eletricidade nos setores residencial, industrial e de transporte no Brasil e nos EUA. Nota-se que o preço da eletricidade é muito maior do que o preço do gás natural e do carvão mineral, uma vez que existe ineficiência na transformação de carvão e gás em eletricidade. A eficiência é de 33%, então é razoável esperar que os preços da eletricidade devam ser significativamente maiores do que os preços das commodities de onde ela é produzida. Nas seções 4.3.1 e 4.3.2 serão feitas análises desses preços mostrados.

⁸ O petróleo possui preços de referência. Existem algumas referências principais: *West Texas Intermediate (WTI)*, *Brent Blend e Dubai Crude e Bonny Light* usado na Nigéria. Há uma diferença entre eles devido à volatilidade (alta grau API é mais valioso) acidez (baixo teor de enxofre é mais valioso) e custo de transporte. Este é o preço que controla o preço do mercado mundial de petróleo (WIKIPEDIA, 2022).

Quadro 4.3 - Preço da eletricidade nos EUA e no Brasil em *cents* USD/kWh.

Setor	Brasil	EUA
Eletricidade Industrial	13,40	6,67
Eletricidade Residencial	15,61	13,15
Transporte ⁹	34,64	9,90

Fonte: Brasil: BEN (2021), EUA: IEA (2019)

4.3.1 Análise dos Preços de Energia nos EUA

Nos EUA, técnicas de perfuração e produção mais eficientes resultaram em aumentos na produção de gás natural, que por sua vez contribuíram para uma queda nos seus preços, aumentando seu uso para a produção de energia elétrica (ELECTRICITY EXPLAINED, 2021). Finalmente, no comércio internacional de carvão, o que impulsiona a variação nos preços são fatores locais de oferta versus demanda e o custo de mineração e extração.

Pelo Quadro 4.3 é possível perceber a diferença entre o preço para os consumidores residenciais e industriais. Ele é geralmente mais alto para consumidores residenciais, pois é mais caro distribuir eletricidade para esse setor. Os consumidores industriais usam mais eletricidade e podem recebê-la em tensões mais altas, portanto, fornecer eletricidade a esses clientes é mais eficiente e menos caro (ELECTRICITY EXPLAINED, 2021).

Além disso, o preço a ser pago na eletricidade varia com a localidade, disponibilidade de usinas de energia e combustíveis, custos de combustível locais e regulamentos de preços.

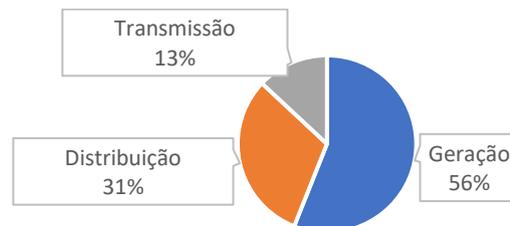
Os preços dos combustíveis, especialmente para gás natural e combustíveis derivados de petróleo podem aumentar durante períodos de alta demanda de eletricidade e quando há restrições ou interrupções no fornecimento de combustível devido a eventos climáticos extremos e danos acidentais ao transporte e infraestrutura de entrega. Os sistemas de transmissão e distribuição de eletricidade que conectam as usinas aos consumidores têm custos de construção, operação e manutenção, que incluem a reparação de danos aos sistemas causados por acidentes ou eventos climáticos extremos. Sem contar que as temperaturas extremas, em função das crises climáticas causadas pelo excesso de emissões de gases de efeito estufa, podem aumentar a demanda por aquecimento e resfriamento. Além disso, os aumentos resultantes na demanda de eletricidade podem aumentar os preços dos combustíveis e da eletricidade.

⁹ Preços do transporte no Brasil: média entre óleo diesel, óleo combustível, gasolina, álcool, gás natural combustível. Nos EUA inclui combustíveis de estradas e ferrovias.

Já as usinas que dependem de fontes naturais são impactadas pela disponibilidade desses recursos, a chuva fornece água para geração de energia hidrelétrica, e o vento fornece geração de eletricidade de baixo custo quando as velocidades do vento são favoráveis. No entanto, quando há secas ou demanda competitiva por recursos hídricos, ou quando a velocidade do vento diminui, a perda de geração de eletricidade dessas fontes pode pressionar para cima outras fontes e preços de energia/combustível. Por fim os regulamentos, que em alguns estados, as comissões de serviço público/utilidade regulam totalmente os preços, enquanto outros estados têm uma combinação de preços não regulamentados (para geradores) e preços regulamentados (para transmissão e distribuição).

Em suma, a participação monetária da tarifa é mostrada na Figura 4.16.

Figura 4.16 - Participação monetária da tarifa de energia nos EUA



Elaboração própria. Fonte: ELECTRICITY EXPLAINED (2021)

4.3.2 Análise dos Preços de Energia no Brasil

No Brasil, o cenário é diferente, tarifa de energia elétrica dos consumidores é constituída por custos com a aquisição de energia elétrica, decorrentes da contratação de montantes de energia por meio dos leilões regulados, onde a distribuidora compra uma quantidade de energia que considera suficiente para o atendimento do seu mercado; pelo uso do sistema de distribuição, que estão inseridos na Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), como as despesas de capital e os custos de operação e manutenção das redes de distribuição; pelo uso do sistema de transmissão, estão inseridos na Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST); pelas perdas técnicas e não técnicas; pelos encargos diversos, que são contribuições instituídas por lei, cujos valores são estabelecidos por resoluções ou despachos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), visando a obter recursos e a financiar necessidades específicas do setor elétrico; e pelos tributos como o PIS (Programa de Integração Social)/PASEP (Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público), COFINS (Contribuição para Financiamento da Seguridade Social) e ICMS (Imposto sobre Circulação de

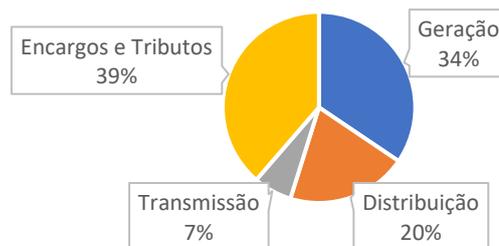
Mercadorias e Serviços) (TARIFAS DE ENERGIA, 2018). O detalhamento de cada encargo e tributo foge ao escopo do trabalho.

A diferença dos preços de eletricidade entre os consumidores residenciais e industriais é pelo motivo de serem são dois tipos de consumidores diferentes: o residencial é considerado como consumidor cativo, onde a distribuidores de energia é a fornecedora compulsória, com tarifa regulada, e o preço é resultante de contratos de longo prazo. Desta forma, eles “absorvem” as incertezas do planejamento centralizado do governo e da distribuidora, participam do rateio dos custos da diferença entre geração programada e realizada, sem poder gerenciá-los. Para equilibrar os custos que as distribuidoras têm com a aquisição de energia é cobrado um valor a mais, chamado bandeira tarifária, que passou a valer em 2015. Esse valor pode variar de patamar, que sinalizam o consumidor quando a energia estará mais cara ou mais barata.

Já o industrial, que é consumidor livre, não arca com o valor das bandeiras tarifárias. O valor da energia é resultante de sua opção individual de compra, que poderá incluir contratos de diferentes prazos e maior ou menor exposição ao preço de curto prazo, sendo responsável por gerir incertezas, erros e acertos na decisão de contratação (DIFERENÇAS ENTRE CONSUMIDORES LIVRES E CATIVOS, 2019).

Em síntese, a participação monetária da tarifa é mostrada na Figura 4.17.

Figura 4.17 - Participação monetária da tarifa de energia no Brasil



Elaboração própria. Fonte: TARIFAS DE ENERGIA (2018)

4.3.3 Impactos na Indústria

O setor industrial nacional foi o maior consumidor de energia em 2020 (utilizou 28,4% do total de energia fornecida), de acordo com dados fornecidos na seção 2.3 sobre os usos finais da energia. Desta forma, o impacto no aumento da energia afeta significativamente a indústria.

Dados do *World Competitiveness Ranking* (2021) mostram que entre os anos 2006 a 2016, a produtividade do trabalho na indústria brasileira cresceu apenas 5,5%, enquanto a produtividade dos Estados Unidos cresceu 16,2%, ocupando a 4ª posição do ranking. O que

resultou a 80ª posição no Ranking Global de Competitividade em 2017. O país acumula quase uma “década perdida” por conta da profunda recessão econômica e crise política, impactando diretamente sobre a competitividade nacional, que por sua vez compromete o crescimento econômico e a geração de emprego e renda.

Ademais, com o aumento dos custos de energia e a crescente preocupação com as repercussões das atividades econômicas sobre o meio ambiente e as mudanças climáticas, é necessário realizar um plano para garantir o acesso da indústria à energia com regras estáveis, preços competitivos e segurança no abastecimento visando aumentar a competitividade brasileira frente ao ambiente internacional (MAPA ESTRATÉGICO DA INDÚSTRIA, 2018).

5 CONCLUSÃO

O trabalho permitiu, a partir da metodologia de pesquisa documental proposta, a análise de fatores que propiciam a transição energética global. Avaliou-se como a matriz energética brasileira chegou ao cenário recente. Nota-se que os conflitos geopolíticos moldam a disponibilidade de energia e as constantes alterações nos seus preços. Além disso, as crescentes crises ambientais, causadas majoritariamente pela emissão de fontes de energias poluentes, aceleram a mudança energética para uma matriz mais renovável.

O Brasil tem seguido a tendência de crescimento da participação das energias renováveis solar, eólica e biomassa. Apesar disso, a geração de energia eólica e solar ainda não supre a demanda de energia elétrica do país. O consumo de petróleo diminuiu nas últimas duas décadas (desde 2000), e está em consonância com o de países desenvolvidos, do grupo G7, embora tenha aumentado o gás natural. A matriz elétrica nacional, mesmo que bastante renovável ao ser comparada com a outros países desenvolvidos, ainda é muito dependente da hidrelétrica, e necessita de maior diversificação.

No que tange às relações entre consumo e desenvolvimento de um país, viu-se que o uso de energia em uma base per capita anual, quando analisado de forma geral, está crescendo muito lentamente. As regiões desenvolvidas, de fato, apresentam valores constantes nos últimos tempos. EUA, Europa e Japão, têm diminuído marginalmente seus valores. Compreendeu-se que, para alcançar o IDH acima de 0,9, ou seja, para uma nação ser considerada desenvolvida, é necessário nada mais que aproximadamente 100 GJ/capita. Neste quesito, o Brasil possui consumo de 57 GJ/capita em 2020, o que mostra que ainda existe espaço para evolução.

Ademais, outro fator avaliado foi o preço que se paga pela energia. Neste sentido, conclui-se que a indústria brasileira, maior setor consumidor, paga caro na eletricidade, quando se compara com o setor industrial estadunidense. Em termos de números, paga-se 13,40 *cents* USD/kWh contra 6,67 *cents* USD/kWh nos EUA. Os impactos que a indústria nacional sofre é a perda da competitividade no âmbito internacional. Nesta lógica é evidente a necessidade de estimular o uso de outras fontes de energia, que garantem não só a segurança de suprimento como avanço tecnológico e social das esferas nacionais.

Como continuidade de trabalhos futuros relacionados ao tema, sugere-se maior aprofundamento no estudo dos impactos econômicos, sociais e tecnológicos que a indústria nacional possui. Também se propõe análise de como esses impactos se relacionam com toda a

complexidade do fornecimento energético tanto no cenário brasileiro quanto no cenário mundial. Uma vez que a atividade industrial possui papel importante para o crescimento da economia de um país.

REFERÊNCIAS

AMPONSAH, N. Y. et al. **Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, p. 461-475. Aberdeen, UK, 2014.

ANGELO, Claudio; RITTIL, Carlos. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do brasil (1970-2018).** [s.l: s.n.]. Disponível em: https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2019/11/OC_SEEG_Relatorio_2019pdf.pdf. Acesso em mar. 2022.

AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis (Summary for Policymakers). [s.l: s.n.]. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf. Acesso em mar. 2022.

Balanco Energético Nacional. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em mar. 2022.

Balanco Energético Nacional 50 anos: cinquenta anos de estatísticas energéticas. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/BEN_50_anos.pdf. Acesso em jan. 2022.

BORGNACKE, C. (Claus); SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da termodinâmica.** 8a ed. São Paulo - SP: Blucher, 2013.

CANO, Telma Monreal. **Carvão Mineral.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/2-2-carvao>. Acesso em fev. 2022.

Bruckner T., I.A. et al. **Energy Systems. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.** Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Capítulo 2 (Oferta e Demanda de Energia por Fonte) 1970-2020. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>. Acesso em jan. 2022.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica.** 7a ed. Porto Alegre - RS: AMGH Editora Ltda., 2013.

D'ALMEIDA, Albino Lopes. **Indústria do Petróleo no Brasil e no Mundo: formação, desenvolvimento e ambiência atual.** [s.l.] : Editora Edgard Blücher Ltda., 2015.

Diferenças entre consumidores livres e cativos. 2019. Disponível em: <https://abraceel.com.br/mercado-livre/diferencas-entre-consumidores-livres-e-cativos/>. Acesso em: mar. 2022.

DRAPCHO, Caye M.; NHUAN, Nghiem Phu; WALKER, Terry H. **Biofuels Engineering Process Technology.** 1a ed. Estados Unidos da América: McGraw-Hill Companies, Inc, 2008. DOI: 10.1016/s1351-4180(08)70584-1.

Electricity explained. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/prices-and-factors-affecting-prices.php>. Acesso em: mar. 2022.

Energy Study 2012: Reserves, Resources and Availability of Energy Resources. [s.l: s.n.]. Disponível em: http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-15e.pdf?__blob=publicationFile&v=3. Acesso em jan. 2022.

Formas de Energia. [s.d.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/formas-de-energia>. Acesso em: mar. 2022.

HILL, J.; Life Cycle Analysis of Biofuels. **Encyclopedia of Biodiversity:** Academic

Press, v. 7, 2ªed. 2013. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/life-cycle-analysis#:~:text=Life%20cycle%20analysis%20\(LCA\)%20is,%2C%20recycling%2C%20and%20final%20disposal](https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/life-cycle-analysis#:~:text=Life%20cycle%20analysis%20(LCA)%20is,%2C%20recycling%2C%20and%20final%20disposal). Acesso em mar. 2022.

IEA Sankey Diagram. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.iea.org/sankey/#?c=IEATotal&s=Balance>. Acesso em dez. 2021.

IEA, 2021. **Oil 2021 Analysis and forecast to 2026.** [s.l: s.n.]. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/1fa45234-bac5-4d89-a532-768960f99d07/Oil_2021-PDF.pdf. Acesso em dez. 2021.

IEA, 2019. **Countries and regions.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.iea.org/countries>. Acesso em: jan. 2022.

IPAM Amazônia. 2015. Disponível em: <https://ipam.org.br/glossario/co2-equivalente-co2e/#:~:text=É uma medida métrica utilizada,acordo com o artigo 5>. Acesso em: mar. 2022.

KANOGLU, Mehmet; ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Fundamentals and applications of renewable energy.** [s.l.]: McGraw-Hill Companies Education, 2020.

LAZARD. 2020. **Lazard's levelized cost of energy analysis - Version 14.0.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.lazard.com/media/451419/lazards-levelized-cost-of-energy-version-140.pdf>. Acesso em fev. 2022.

LEITE, Rogério Cerqueira; CORTEZ, Luís Augusto Barbosa. O etanol combustível no Brasil. In: **Biocombustíveis no Brasil: realidades e perspectivas.** [s.l: s.n.]. p. 61–75. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/etanol3_000g7gq2cz702wx5ok0wtedt3xdrmfk.pdf. Acesso em mar. 2022.

Mapa Estratégico da Indústria 2018-2020. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2018/3/mapa-estrategico-da-industria-2018-2022/>. Acesso em nov. 2021.

Natural gas explained: factors affecting natural gas prices. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/factors-affecting-natural-gas-prices.php>. Acesso em fev. 2022,

Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (versão para consulta pública). [s.l: s.n.]. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-609/Relatorio_PDE2031_ConsultaPublica.pdf. Acesso em jan. 2022.

Plano Nacional de Energia 2050. [s.l: s.n.]. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio Final do PNE 2050.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio_Final_do_PNE_2050.pdf). Acesso em jan. 2022

Relatório do Desenvolvimento Humano 2020. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_2020_overview_portuguese.pdf. Acesso em fev. 2022.

Renewable Power Generation Costs in 2019, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [s.l: s.n.]. Disponível em https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf. Acesso em mar. 2022.

Resenha Energética Brasileira Ano Base 2019. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/documents/36208/948169/Resenha+Energética+Brasileira+-+edição+2020/ab9143cc-b702-3700-d83a-65e76dc87a9e>. Acesso em dez. 2021.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. **Fossil Fuels.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels#reserves-vs-resources-when-does-a-resource-become-a-reserve>. Acesso em jan. 2022

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. **CO₂ emissions.** 2020. Disponível em:

<https://ourworldindata.org/co2-emissions>. Acesso em: mar. 2022.

SMIL, Vaclav. World History and Energy. **Encyclopedia of Energy**, [S. l.], v. 6, p. 549–561, 2004. Disponível em: <http://www.vaclavsmil.com/wp-content/uploads/docs/smil-article-2004world-history-energy.pdf>. Acesso em nov. 2021.

SMIL, Vaclav. Energy Transitions: global and national perspectives. 2a ed. [s.l.] : PRAEGER, 2016. Acesso em nov. 2021.

SMIL, Vaclav. **Energy and Civilization: A History**. Cambridge, MA - Estados Unidos da América: The MIT Press, 2017. Acesso em nov. 2021.

Statistical Review of World Energy - all data, 1965-2020. 2021. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. Acesso em nov. 2021.

Statistical Review of World Energy 70th edition. 2021a. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>. Acesso em nov. 2021.

Tarifas de Energia. 2018. Disponível em: <https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/>. Acesso em: mar. 2022.

Uranium 2020: Resources, Production and Demand. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand. Acesso em fev. 2022.

Use of energy explained. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/#:~:text=In%202020%2C%20U.S.%20per%20capita,to%20the%20COVID%2D19%20pandemic>. Acesso em: mar. 2022.

Using of energy explained: energy use in homes. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/electricity-use-in-homes.php>. Acesso em

fev. 2022.

WIKIPEDIA. **Benchmark (crude oil)**. [s.l: s.n.]. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Benchmark_\(crude_oil\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Benchmark_(crude_oil)). Acesso em: mar, 2022.

World Competitiveness Ranking. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.imd.org/centers/world-competitiveness-center/rankings/world-competitiveness/>. Acesso em fev. 2022.