

TECNOLOGIAS AMBIENTAIS PARA ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Cap. 1 – Introdução: A Crise Ambiental Planetária

Este livro tem como objetivo apresentar tecnologias para melhoria da qualidade de vida dos jovens à luz do Estatuto da Juventude. Este extrato da população será aquele que mais sentirá os impactos de um mundo com um sistema climático crescentemente hostil à vida como a conhecemos e que testará, nas próximas décadas e séculos, os limites da própria civilização.

Em todo o globo, crescem as notícias sobre extremos climáticos nunca antes registrados: 2024 foi o ano mais seco já registrado no Brasil, atingindo particularmente a Amazônia e o Pantanal. Por outro lado, foi em 2024 que ocorreu a enchente mais devastadora já registrada, atingindo grande extensão do estado do Rio Grande do Sul.

Em adição a isto, a visível perda da biodiversidade, a crescente dificuldade no acesso à água ocasionando quebras de safra na produção de alimentos, a desigualdade econômica gerando tensões sócio-políticas mundo afora causa perplexidade aos jovens de hoje, podendo levar a depressão, paralisia, sensação de impotência.

No entanto, o mundo nunca foi tão rico, tão conectado, com um cabedal de conhecimento acumulado sem precedentes e que cresce exponencialmente e disponível na palma da mão de quase todos os cidadãos adultos do planeta. As ferramentas digitais já existentes, particularmente com o alvorecer da inteligência artificial, proporcionam possibilidades de geração e trocas de informação quase instantânea. Esta é uma das chaves que permitirá que a sociedade navegue com sucesso nos mares revoltos em que nos encontramos.

Por outro lado, para além da tecnologia, existe a necessidade de uma reconexão das pessoas com a natureza. A vida moderna, crescentemente urbana, tem proporcionado conforto e bem-estar material sem precedentes, mas às custas da extração crescente e insustentável de recursos naturais. Até o momento, nenhuma nação tem conseguido prosperar sem aumentar o consumo dos recursos que o planeta disponibiliza. Tecnologias ancestrais terão que ser redescobertas e tecnologias modernas terão que ser desenvolvidas para dotar a humanidade de ferramentas que a permita fazer mais com menos, pois a Terra está pedindo socorro.

O restante deste capítulo resume as grandes questões concernentes às agressões ao meio ambiente do planeta proporcionado pelo homem, com ênfase nas mudanças climáticas antropogênicas. À medida que a gravidade do problema foi sendo evidenciado, houve uma mudança semântica: a questão do clima começou rotulada como “efeito estufa”, passou para o “aquecimento global”, evoluiu para “mudanças climáticas” e atualmente está sendo identificada como “emergência climática”, mas também crise ou colapso climático.

1.1 - O Antropoceno e as Fronteiras Planetárias

Humanos sempre afetaram o meio ambiente em que viveram, mas os impactos até certo tempo atrás eram locais ou regionais. O desenvolvimento da agricultura e o início da Revolução Industrial levaram a um explosivo crescimento populacional, que hoje atinge 8 bilhões de seres humanos. Em 1750, no início da Revolução Industrial, éramos cerca de 700 milhões e, somente no século XX, a população humana cresceu de 1,65 para 6 bilhões. Tal crescimento exerceu pressões importantes sobre os recursos naturais do planeta. A necessidade crescente de fornecimento de alimentos, água, energia e de bens de consumo em geral está transformando a face do planeta (Artaxo, 2014a).

Esforços internacionais de pesquisa sobre o sistema terrestre nas últimas três décadas levaram à conclusão de que a Terra teria entrado em uma nova era geológica, o Antropoceno. O termo define o período geológico mais recente da Terra como sendo influenciado pelo homem, ou antropogênico, baseado em evidências globais esmagadoras de que os processos atmosféricos, geológicos, hidrológicos, da biosfera e de outros sistemas terrestres são agora alterados pelos seres humanos. A palavra combina a raiz "anthropo", que significa "humano" com a raiz "-cene", o sufixo padrão para "época" no tempo geológico.

O Antropoceno se distingue como um novo período seja depois ou dentro do Holoceno, a época atual, que começou há 11,7 mil anos atrás, com o fim do último período glacial. Em substituição ao Holoceno, esta nova era evidencia os riscos à estabilidade e à resiliência do sistema terrestre, pré-requisitos indispensáveis para o desenvolvimento humano.

O conceito de Fronteiras Planetárias identifica dez prioridades globais relacionadas a mudanças induzidas pelo homem no meio ambiente e que justificam a proposta de alcinha do termo Antropoceno para a presente era. A partir de um estudo conduzido em 2009, foram propostas 10 fronteiras planetárias, conforme abaixo:

- 1) mudanças climáticas;
- 2) perda de ozônio estratosférico;
- 3) acidificação dos oceanos;
- 4) ciclos biogeoquímicos do nitrogênio;
- 5) ciclo biogeoquímico do fósforo
- 6) mudanças na integridade da biosfera associadas à perda de biodiversidade;
- 7) mudanças no uso do solo;
- 8) uso de recursos hídricos;
- 9) carga de partículas de aerossóis na atmosfera;
- 10) introdução de entidades novas e poluição

A ciência mostra que esses dez processos e sistemas regulam a estabilidade e a resiliência do Sistema Terrestre - as interações da terra, do oceano, da atmosfera e da vida, que juntas fornecem condições das quais nossas sociedades dependem. Por ocasião do lançamento do citado estudo, alguns limites planetários já haviam sido cruzados como resultado da atividade

humana: mudança do clima (a ser tratado na próxima seção), perda da biodiversidade e ciclos biogeoquímicos alterados (fósforo e nitrogênio), devido ao uso abusivo de fertilizantes. Duas delas, a mudança climática e a integridade da biosfera (preservação da biodiversidade), são o que os cientistas chamam de "limites fundamentais". Alterar significativamente qualquer um desses limites centrais levará o Sistema Terrestre a um novo estado.

Estudos posteriores foram conduzidos para avaliar as tendências do estado das fronteiras planetárias. A figura 1.1 mostra sua evolução até 2023, quando seis dos nove limites estudados já haviam sido ultrapassados. Notar que os ciclos biogeoquímicos do nitrogênio e do fósforo foram incluídos em uma única categoria e ambos extrapolaram seus limites naturais. Somente as fronteiras 2 (perda de ozônio estratosférico), 3 (acidificação dos oceanos) e 9 (presença de aerossóis) ainda não foram ultrapassadas.

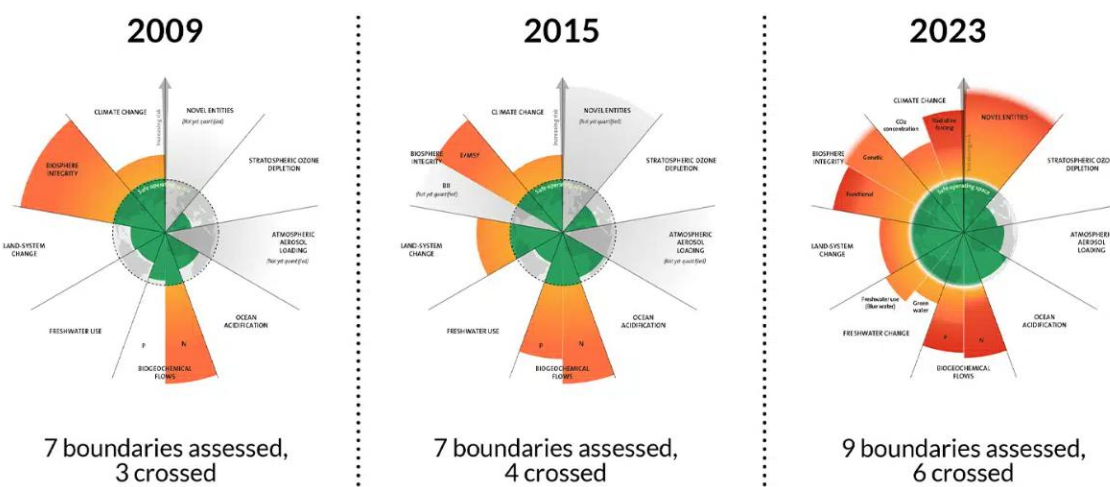


Figura 1.1: Evolução dos limites planetários ¹

Fonte: Earth.org

Alguns cientistas ponderam que a atividade humana contribuiu para a Extinção da Megafauna Quaternária, entre 50.000 e 3.000 anos atrás, que atingiu cerca de metade das grandes espécies de mamíferos terrestres (> 40 kg). A intensa caça e exploração de mamíferos marinhos resultou em uma diminuição de aproximadamente 80% na biomassa global de mamíferos marinhos. Enquanto a biomassa total de mamíferos silvestres (tanto marinhos quanto terrestres) diminuiu em 85%, a massa total de mamíferos aumentou em 300%, devido ao grande aumento da biomassa da humanidade e dos animais por ele criado. O impacto da civilização humana na biomassa global não se limitou aos mamíferos, mas também afetou profundamente a quantidade total de carbono sequestrado pelas plantas. Um censo mundial do número total de árvores, bem como uma comparação entre a biomassa potencial e real, sugere que a biomassa

¹ A área em verde denota a margem de segurança para o desenvolvimento humano e a área em vermelho indica a atual posição de cada processo. Os pontos indicam a evolução decadal a partir de 1950.

total das plantas (e, por consequência, a biomassa total na Terra) diminuiu aproximadamente 50% em relação ao seu valor antes do início da civilização humana.

As 8 bilhões de pessoas do mundo representam apenas 0,01% de todos os seres vivos. No entanto, desde o alvorecer da civilização, a humanidade causou a perda de 83% de todos os mamíferos selvagens e metade das plantas, enquanto o gado mantido por humanos é abundante. Os autores revelam que a avicultura de hoje representa 70% de todas as aves do planeta, com apenas 30% sendo selvagens. A distorção é ainda maior para com os mamíferos - 60% de todos os mamíferos da Terra são animais, principalmente bovinos e suínos, 36% são humanos e apenas 4% são animais selvagens.

A destruição do habitat selvagem para agricultura, extração de madeira e desenvolvimento resultou no começo do que muitos cientistas consideram a sexta extinção em massa a ocorrer nos 4 bilhões de anos em que há vida da Terra, uma vez que metade dos animais foram perdidos nos últimos 50 anos. Durante anos, paleontologistas e especialistas em biodiversidade acreditaram que, antes da chegada da humanidade, cerca de 200.000 anos atrás, a taxa de origem de novas espécies em extinção de espécies existentes era de aproximadamente uma espécie por milhão de espécies por ano. Como consequência da atividade humana, acredita-se que a taxa atual de extinção global seja entre 100 e 1.000 vezes maior do que era originalmente (Wilson, 2017).

As fronteiras planetárias transgredidas evidenciam áreas de ação onde é necessário agir urgentemente para salvaguardar a resiliência do planeta, quais sejam: os sistemas de energia, a água, os alimentos e os ambientes urbanos, todos “pontos de pressão” significativos cujas mudanças recentes ocorrem a taxas exponenciais. Estas devem ser, portanto, as áreas prioritárias para procurar soluções (MCTI, 2017).

De fato, as necessidades de alimentação são hoje em dia responsáveis pelo maior consumo mundial de água fresca e subterrânea, e a maior responsável para ultrapassarmos os limites planetários associados aos ciclos de nutrientes (nitrogênio/fósforo/carbono), usos do solo e biodiversidade. A transformação do sistema alimentar tem, portanto, potencial para melhorar a saúde e o bem-estar pessoal, social e planetário. A descarbonização do sistema energético global é também, e mais do que nunca, de importância vital para a garantia de manutenção do limite de aumento de temperatura global entre 1,5 e 2,0 °C. A água, fonte de vida, está igualmente sob pressão severa, e o estresse dos sistemas hídricos e a escassez estão aumentando em muitas partes do mundo. Por fim, as projeções indicam que em 2050, 75% da população mundial viverá em áreas urbanas. Esta mudança global exige um foco principal na transformação dos sistemas urbanos atuais em ambientes sustentáveis.

Tendo em perspectiva os riscos apontados pelos diferentes estudos da evolução recente do sistema terrestre, a Organização das Nações Unidas (ONU) acordou em 2015 uma série de medidas transformadoras que buscam a sustentabilidade do planeta, a Agenda 2030 para o

Desenvolvimento Sustentável, comprometida com as pessoas, o planeta, a promoção da paz, da prosperidade e de parcerias. A Agenda 2030 engloba 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), conforme a figura 2. Elas são traduzidas através de 169 metas, orientadas a traçar uma visão universal, integrada e transformadora para um mundo melhor. A ciência e tecnologia voltada para o desenvolvimento sustentável foi considerada essencial para o atingimento das metas traçadas. As ODS serão tratadas no último capítulo, sobre tecnologias ambientais.



Figura 1.2: Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Há uma anedota que bem resume a situação em que nos encontramos: no início dos trabalhos do IPCC², na década de 1990, um cientista japonês idoso interveio numa das reuniões e disse: “nós, cientistas, descobrimos que há um problema de emissões, mas não podemos resolvê-lo, pois, uma vez que o CO₂ é produzido por máquinas, teremos que chamar os engenheiros. Estes, por sua vez, dirão que existe a tecnologia necessária para resolver o problema, mas que custa dinheiro, por isso os economistas serão chamados. Os economistas farão os seus cálculos e dirão que, para o conseguir, teremos de mudar a nossa modelo social atual baseado em transporte individual, desperdício de energia etc., assim serão chamados os sociólogos. Eles, por sua vez, dirão que é um problema de escala de valores que não conseguem resolver, por isso serão chamados os filósofos. para nos dizer quais valores devemos colocar nosso esforço e interesse”.

1.2 – Gases de Efeito Estufa e as Mudanças Climáticas

² IPCC é a sigla do Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas, órgão composto por cientistas que trabalham voluntariamente para realizar, periodicamente, uma avaliação do estado da arte da Ciência das Mudanças Climáticas (Grupo de Trabalho I), dos Impactos e Vulnerabilidade das Mudanças Climáticas (Grupo II) e Mitigação das Mudanças Climáticas (Grupo III).

Há séculos, o homem tenta entender como o sol e a atmosfera³ interagem na determinação do clima⁴ de uma localidade. É intuitivo que a intensidade da insolação determine a temperatura da atmosfera: o verão é mais quente do que o inverno, pois a incidência solar é maior. As mudanças nas estações do ano trazem alterações climáticas visíveis aos nossos olhos. Elas tendem a se repetir de maneira relativamente uniforme, nos são familiares.

O Sol é a fonte de energia que controla a circulação da atmosfera. Ele emite energia em forma de radiação eletromagnética. Uma parte dessa radiação é interceptada pelo sistema Terra-atmosfera e convertida em outras formas de energia como, por exemplo, calor e energia para circulação atmosférica. A energia solar não é distribuída igualmente sobre a Terra e é esta distribuição desigual que gera as correntes oceânicas e os ventos que, por sua vez, transportando calor dos trópicos para os polos, procuram atingir um balanço de energia.

Por outro lado, a atmosfera é composta por diferentes gases que são determinantes para a ocorrência dos diferentes fenômenos do tempo e do clima. Este fenômeno é demonstrado quando se nota que a temperatura média do planeta Vênus é de 465 °C, ao passo que a temperatura da superfície de Mercúrio varia entre -180 °C e 430 °C, com uma média de 167 °C, mesmo estando mais próximo do Sol do que Vênus. Este possui uma espessa camada atmosférica 100 vezes mais espessa do que a Terra, contendo 96% de dióxido de carbono (CO₂), um gás de efeito estufa (GEE) ao passo que Mercúrio não possui atmosfera.

A atmosfera terrestre é um imenso fluido que envolve o planeta e protege a vida. Sua existência se deve à força gravitacional, que evita que seus gases se dispersem no espaço e faz com que fiquem concentrados, principalmente próximos à superfície. A uma altura de 16 km a densidade do ar é apenas 10% daquela encontrada ao nível do mar. Ela é composta por quatro camadas, conforme abaixo:

- Troposfera: é a camada inferior, se estende desde a superfície da terra até uma altitude média de 12 km (20 km no Equador e 8 km nos polos. Nela, a temperatura diminui com a altitude. É nesta camada que ocorrem essencialmente todos os fenômenos meteorológicos que caracterizam o tempo, tais como nuvens, furacões, tornados, frentes frias, chuvas, etc.
- Estratosfera: camada subsequente, até uma altura de cerca de 50 km. Nela, a temperatura aumenta com a altitude, por causa da absorção da radiação ultravioleta do Sol pelo ozônio. É na estratosfera que se situa a camada de ozônio.
- Mesosfera: situada a partir da estratosfera até cerca de 80 km da superfície. Nela, a temperatura diminui com a altitude.

⁴ Clima é definido como a média do tempo ou, de forma mais rigorosa, como uma descrição estatística de certas variáveis (temperatura, chuva, vento, etc.), em termos da sua média e variabilidade, em certo período de tempo, normalmente 30 anos, conforme definido pela Organização Meteorológica Mundial.

- Termosfera: se estende desde a estratosfera até o espaço, e onde a temperatura é inicialmente **isotérmica** e, depois, cresce rapidamente com a altitude, como resultado da absorção de ondas curtas da radiação solar, por átomos de oxigênio e nitrogênio.

Os gases nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) ocupam até 99% do volume do ar seco e limpo do ar. 0,9% se deve ao gás argônio. Embora estes gases sejam os mais abundantes, eles têm pouca influência sobre os fenômenos climáticos. A importância de um gás ou aerossol⁵ não está relacionada à sua abundância relativa. Por exemplo, embora a concentração de CO_2 na atmosfera terrestre esteja atualmente em torno de 0,042% (420 ppm), ele é um importante gás para o fenômeno chamado efeito estufa, que será discutido à frente.

O Sol emite luz com uma distribuição semelhante ao que seria esperado a partir de um corpo negro⁶ a 5.800 K (5.527 °C), que é aproximadamente a temperatura de sua superfície. Quando a luz atravessa a atmosfera, parte é absorvida por gases com bandas de absorção⁷ específicas. O ozônio (O_3), por exemplo, absorve numa banda na faixa do Ultravioleta, em comprimentos de onda inferiores a 300nm. O vapor d'água e o dióxido de Carbono (CO_2) absorvem em várias bandas na faixa do infravermelho em comprimentos de onda superiores a 1000nm, por isso eles serem os principais gases que causam o “efeito estufa”. Isto pode ser visto na figura 1.3, onde se percebe faixas espectrais de energia que são detectadas por satélites no topo da atmosfera (preto) e que não são detectadas por sensores na superfície (vermelho).

⁵ **Aerossol** é o conjunto de pequeninas massas líquidas ou sólidas que podem se locomover pelo ar ou se tornar aéreas por força de um processo físico qualquer, como o vento ou um trator puxando o arado. A poluição atmosférica normalmente é composta de gases tóxicos acompanhados de aerossóis gerados pelas diversas atividades antrópicas.

⁶ Um corpo negro é um corpo físico idealizado que absorve toda radiação eletromagnética incidente, independentemente da frequência ou ângulo de incidência. A radiação emitida por um corpo negro em equilíbrio térmico com seu ambiente é chamada de radiação de corpo negro.

⁷ Espectros de absorção são criados quando a luz passa por uma substância e elétrons na substância absorvem energia, movendo-se de um estado fundamental para um estado de energia mais alto. O espectro de absorção de uma substância é determinado por sua composição atômica e molecular, e pode ser usado para identificar elementos e determinar concentrações.

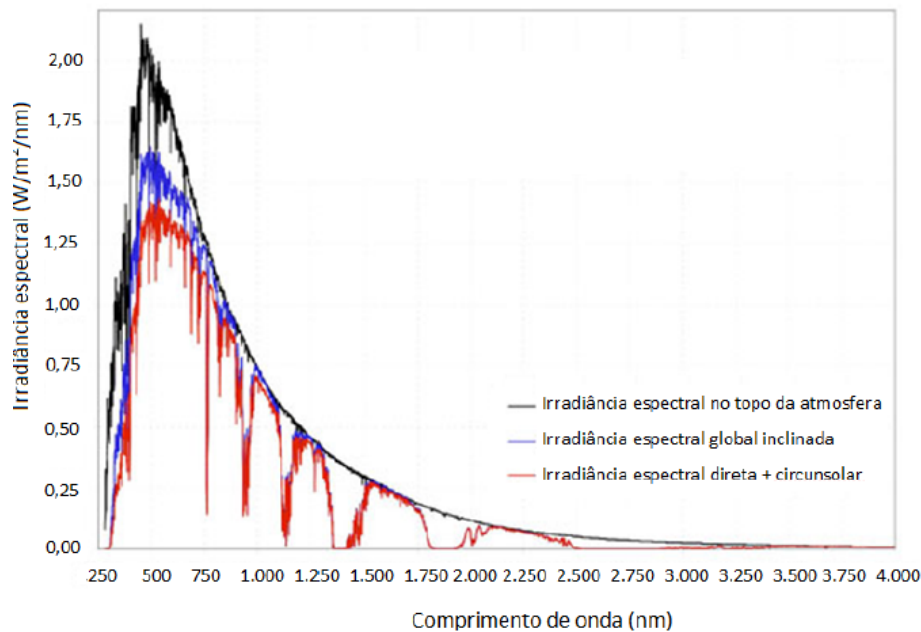


Figura 1.3 - Distribuição espectral da irradiância no topo da atmosfera; da irradiância ao incidir perpendicularmente sobre uma superfície inclinada (37°) ao nível do mar e voltada para a linha do Equador; da irradiância após atravessar uma massa de ar de 1,5.

Outra parte da radiação incidente na atmosfera interage com esta e é espalhada em todas as direções, constituindo a radiação difusa. O espalhamento da luz pelas moléculas dos gases da atmosfera é denominado de espalhamento de Rayleigh, que se aplica a partículas esféricas de dimensões pequenas em relação ao comprimento de onda incidente, ou seja, quando o raio da partícula é menor do que 1/10 do comprimento de onda, o que se refere às moléculas dos gases presentes na atmosfera. Ainda de acordo com a teoria, o espalhamento é uma função contínua da frequência (ou comprimento de onda) e proporcional à sua quarta potência, de forma que sua intensidade é maior para a faixa espectral mais elevada em frequência, o que corresponde às cores azul e do violeta. Assim, o espalhamento é a principal razão pela qual o céu é azul.

O material em suspensão na atmosfera (particulado) e as nuvens também causam espalhamento da luz, mas de forma igual para todos os comprimentos de onda, ou seja, espalham a luz branca. As perdas do fluxo de potência entre o espectro da irradiância incidente no topo da atmosfera e o espectro da irradiância global que atinge a superfície inclinada (com massa de ar = 1,5) são de aproximadamente 27%, resultando em cerca de 1.000 W/m² incidentes sobre a referida superfície, cabendo ressaltar que este nível de irradiância é considerado como valor padrão para a especificação da potência nominal de uma célula ou de um módulo fotovoltaico.

A vida na Terra não existiria da forma como se conhece se não houvesse o efeito estufa natural. É esse fenômeno que ocorre devido à presença de certos gases na atmosfera que possibilitam uma temperatura média na superfície da ordem de 15°C. Sem a presença desses gases, a temperatura atmosférica média de nosso planeta seria de -18°C⁸, e com drásticas variações entre

⁸ O anexo 1 mostra como calcular a temperatura de equilíbrio da Terra, caso não houvesse o efeito estufa natural.

os extremos. Basta ver que, apesar da lua se encontrar à mesma distância média do sol que a Terra (150 milhões km), a temperatura de sua superfície pode atingir + 120°C durante o dia e 130°C negativos à noite. Muito provavelmente não haveria a presença de água líquida, condição necessária para a emergência da vida. A tabela 1.1 mostra a contribuição dos principais gases de efeito estufa natural encontrados na atmosfera.

Tabela 1.1: Contribuição dos principais GEEs para o efeito estufa natural atmosférico da Terra

Vapor D'água	20,6°C
Dióxido de carbono	7,2°C
Ozônio	2,4°C
Óxido nitroso	1,4°C
Metano	0,8°C
Outros	0,6°C
Total	33,0°C

A flutuação na concentração atmosférica de CO₂ apresenta forte correlação com a temperatura, de acordo com diversos registros paleoclimáticos. A figura 1.4 mostra a evolução das concentrações de CO₂ e temperatura ao longo dos últimos 400.000 anos, de acordo com testemunhos de gelo extraídos na Antártica. É possível notar que a concentração de CO₂ nunca excedeu 300 ppm (partes por milhão) neste intervalo de tempo, mais um indicativo de que a elevação recente se deve às atividades humanas.

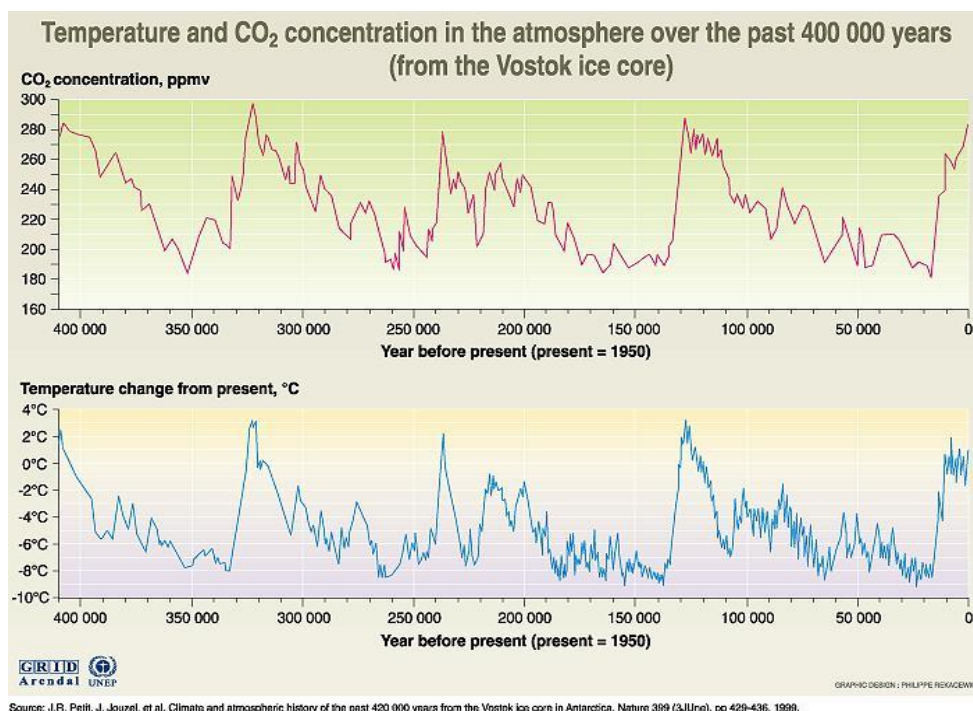


Figura 1.4: Evolução da temperatura e da concentração de CO₂ nos últimos 400.000 anos

Entretanto, o equilíbrio climático é tão sensível que uma pequena mudança de um grau Celsius pode causar consequências devastadoras no sistema biosférico de sustentação da vida no planeta, que ameaçam não só a biodiversidade, mas também os grupos humanos ambientalmente vulneráveis à instabilidade climática registros científicos vêm indicando que esse fenômeno tem se intensificado, com conseqüente elevação da temperatura na Terra. Atribui-se à intensificação do efeito estufa a responsabilidade pelas grandes alterações climáticas que o planeta está vivendo no momento.

Para compreender o conceito de efeito estufa, é preciso saber como funciona a trajetória da radiação solar, desde a sua chegada ao planeta até atingir a superfície da Terra, retornando ao espaço em seguida. Quando a radiação solar atinge a Terra, 30% é refletida, 19% absorvida pela atmosfera e os 51% da radiação restante é absorvida pela superfície do globo.

Assim, é possível efetuar um balanço de energia no Sistema Terra – Atmosfera, ou seja, a diferença entre a entrada de radiação solar (ondas curtas, de alta energia) na atmosfera e a saída, um misto de ondas curtas (radiação solar refletida por gases atmosféricos, topos de nuvens ou superfícies claras) e ondas longas (emissão de ondas longas, na faixa do infravermelho, a partir da superfície aquecida do planeta).

O termo balanço de radiação da Terra (ERB, sigla em inglês) representa a diferença entre a energia de entrada (radiação solar absorvida) e saída (radiação térmica emitida) da atmosfera num dado intervalo de tempo. O projeto *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES), da NASA, fornece observações baseadas em medições de instrumentos presentes em vários satélites junto com dados de muitos outros instrumentos para produzir um conjunto abrangente de dados de ERB, para pesquisa de clima, tempo e ciência aplicada.

Sem um fator externo no sistema climático (antropogênico ou natural), a média de longo prazo da radiação solar absorvida (ASR, sigla em inglês) pelo planeta deve ser igual à radiação térmica emitida (ETR, sigla em inglês) para o espaço. Neste cenário, a temperatura da superfície permanece constante quando calculada em média por um longo período de tempo.

Ocorre que desde o início da Revolução Industrial, e sobretudo após a Grande Aceleração ocorrida desde a inauguração da sociedade de consumo nos anos 1950 em diante, as emissões de gases de efeito estufa vem aumentando progressivamente, o que tem acarretado no aumento de suas concentrações na atmosfera, como será visto adiante.

O aumento na concentração dos gases de efeito estufa atmosféricos tem retido mais radiação térmica emitida da superfície, reduzindo assim a ETR e levando a um ganho líquido de energia. Isso é conhecido como desequilíbrio energético da Terra (EEI, em inglês). A maior parte desse excesso de energia (93%) é armazenada como calor no oceano. O restante aquece a atmosfera e a terra, e derrete neve e gelo. Para restaurar o equilíbrio entre ASR e ETR, a temperatura média

da Terra precisa aumentar, o que de fato tem acontecido. A figura 1.5 mostra como a temperatura média da superfície da Terra tem se elevado ao longo dos últimos 140 anos.

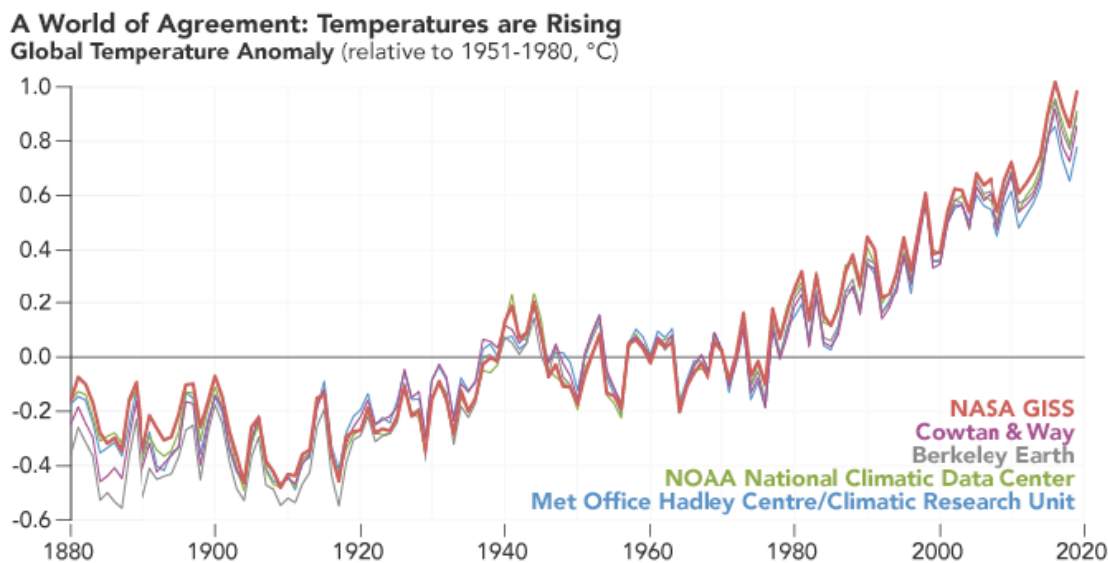


Figura 1.5 – Evolução da temperatura média da Terra, de acordo com cinco instituições

Fonte: <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures>

Os registros de temperatura global começam por volta de 1880 porque as observações não cobriram suficientemente o planeta antes dessa época. O gráfico de linhas acima mostra anomalias anuais de temperatura de 1880 a 2020, conforme registrado pela NASA, NOAA⁹, Berkeley Earth Research Group¹⁰, Met Office Hadley Centre¹¹ (Reino Unido) e a análise de Cowtan e Way. Embora haja pequenas variações de ano para ano, todos os cinco registros mostram picos e vales em sincronia entre si. Todos mostram aquecimento rápido nas últimas décadas e todos mostram a última década como a mais quente.

A equipe do NASA escolheu o período de 1951-1980 como sua linha de base, em grande parte porque o Serviço Nacional de Meteorologia dos EUA e a Organização Meteorológica Mundial usam um período de três décadas para definir a temperatura "normal" ou média. O objetivo é fornecer uma estimativa da mudança de temperatura que possa ser comparada com previsões de mudanças climáticas globais em resposta ao dióxido de carbono atmosférico, aerossóis e mudanças na atividade solar.

As análises de temperatura da NASA incorporam medições de temperatura de superfície de mais de 20.000 estações meteorológicas, observações de temperaturas da superfície do mar baseadas em navios e boias e medições de temperatura de estações de pesquisa da Antártida.

⁹ NOAA – A Administração Oceânica e Atmosférica Nacional é uma agência científica e reguladora norte-americana encarregada de prever o tempo, monitorar as condições oceânicas e atmosféricas, mapear os mares, entre outros.

¹⁰ A Berkeley Earth é uma organização sem fins lucrativos focada em ciência climática e análise de dados ambientais.

¹¹ O Met Office Hadley Centre é um dos principais centros do Reino Unido para o estudo de questões científicas associadas às mudanças climáticas.

Essas medições in situ são analisadas usando um algoritmo que considera o espaçamento variado de estações de temperatura ao redor do globo e os efeitos de ilha de calor urbana.

O efeito ilha de calor é um fenômeno climático que ocorre quando as cidades têm temperaturas mais altas do que as áreas rurais próximas. Esse efeito é mais acentuado à noite e no inverno e é causado por menos áreas verdes, mais concreto, asfalto e materiais de construção escuros, que absorvem mais calor. Além disso, a ocupação desordenada do solo e a geometria urbana típica, com ruas estreitas e edifícios altos, que bloqueiam o vento agravam o problema.

O último episódio de aquecimento global do planeta ocorreu entre o último máximo glacial (21.000 atrás) e o início do Holoceno, há 11.700 anos. O aumento médio de temperatura observado no período foi de aproximadamente 5 °C, ou seja, cerca de 1° C a cada 2000 anos. Por outro lado, a trajetória de crescimento da temperatura média global observada nos últimos 150 anos (1,4 °C) ocorre numa velocidade vinte vezes maior do que aquela observada na passagem da última era glacial para o atual período interglacial, reforçando o caráter antropogênico da escalada ora observada.

Diferentes gases de efeito estufa possuem diferentes fontes naturais e antropogênicas. Cada GEE tem um impacto diferente no que toca o aquecimento da atmosfera, pois possuem diferentes tempos médios de residência na atmosfera e também capacidades distintas de excitação com a radiação emitida pela Terra. Adotou-se o conceito de GWP (potencial de aquecimento global, sigla em inglês), um indicador do quanto um GEE contribui para o aquecimento global, quando comparado com o CO₂, numa janela de tempo específica. O GWP é calculado comparando o forçamento radiativo¹² causado por uma emissão unitária de um poluente ao forçamento radiativo causado por uma massa equivalente de CO₂. Normalmente, a janela considerada é de 100 anos, mas existem cálculos que consideram 20 ou 500 anos, o que pode resultar em confusão. A tabela 1.2 mostra os principais GEEs, suas principais fontes de emissão e seu GWP, considerando a janela default (100 anos).

Tabela 1.2: Principais GEEs, suas fontes de emissão e GWP

¹² Forçamento radiativo é a diferença entre o fluxo de radiação solar que a Terra absorve e a energia que ela emite de volta. É uma perturbação no equilíbrio de energia do planeta e é medido em watts/m².

Principais GEEs	Principais Fontes de Emissão	Vida Média na Atmosfera	GWP (100 anos)	Impacto no forçamento radiativo
CO ₂	Queima de combustível fóssil; desmatamento e uso do solo; fabricação de aço e cimento.	100 anos	1	76%
CH ₄	Aterros sanitários; cultivo de arroz; criação de gado ruminante; vazamento de GN	10 anos	29	16%
N ₂ O	Produção de fertilizantes nitrogenado; queima de combustíveis fósseis	150 anos	273	6%
CFC 12	Fabricação de solventes, refrigerantes, aerossóis; formação de espumas	130 anos	7300	2%
HCFC 22		15 anos	1500	

Analisando a tabela acima vê-se o peso desproporcional do CO₂ como fonte de aquecimento da atmosfera, devido ao fato de que suas emissões serem bem mais expressivas do que a dos demais gases. Não à toa, adota-se o termo CO₂e (CO₂ equivalente) para caracterizar o efeito do conjunto global dos GEEs emitidos pela sociedade.

A figura 1.6 mostra uma escalada contínua nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) por parte da sociedade humana, desde a segunda metade do século XIX aos dias de hoje. Fica claro como a mudança de uso da terra (que envolve remoção de vegetação e manejo de solo para fins agropastoris, reflorestamento, provimento energético etc.), foi, historicamente, a principal fonte de emissões antropogênicas globais de CO₂ até a segunda metade do século XIX, pois, até então, a biomassa (esterco seco, lenha, carvão vegetal) era praticamente a única fonte energética disponível, sendo o carvão a única alternativa (fóssil), mas praticamente restrito ao Reino Unido.

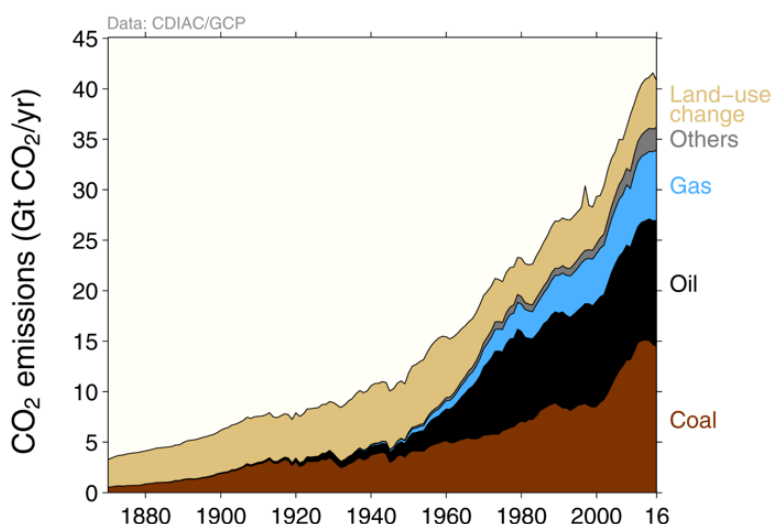


Figura 1.6 - Evolução das emissões antropogênicas globais de CO₂, por fonte
 Fonte: Global Carbon Project (GCP) – Global Carbon Budget 2017

A partir do advento dos motores a combustão interna, que criaram demanda por diesel e gasolina, e o início da eletrificação, a Revolução Industrial começou a tomar corpo em um número significativo de países (EUA, França, Alemanha, Japão etc.), de forma que o carvão ascendeu à condição de principal energético do planeta, na virada do século XIX para XX. Após a 2ª Guerra Mundial, iniciou-se a ascensão global do petróleo como energético (e emissor de CO₂) e, a partir da virada do milênio, o gás natural (GN) adquiriu proeminência entre as principais fontes fósseis, emissoras de CO₂.

O aumento das emissões de CO₂ naturalmente tem acarretado no aumento de sua concentração na atmosfera, conforme pode se ver na figura 1.5:

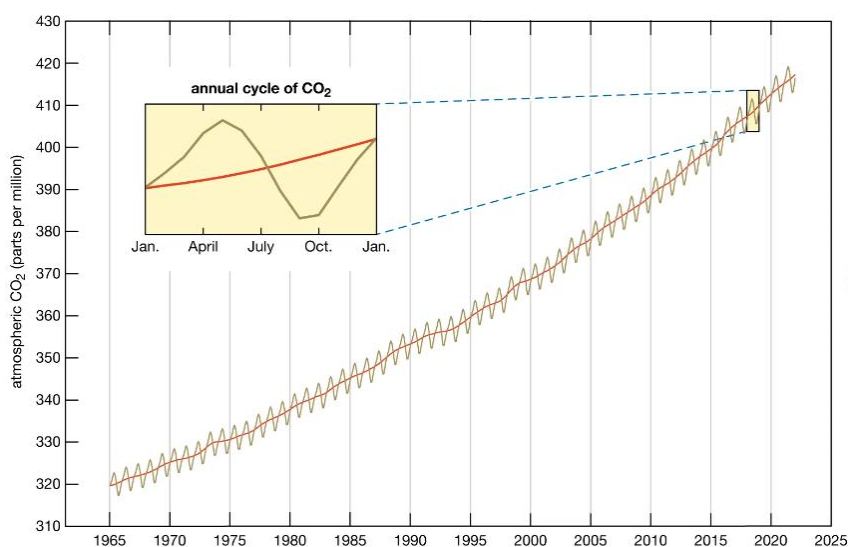


Figura 1.5 – Evolução da concentração de CO₂ na troposfera

Fonte: NOAA - Estação Climática de Mauna Loa, Havaí

A figura acima mostra como a evolução da concentração atmosférica de CO₂ aumenta a cada ano, mas também revela um ciclo interanual, no qual a sua concentração entre abril e outubro sofre uma queda. Isto se deve ao aumento da atividade fotossintética no hemisfério norte neste período, quando há maior insolação. Como lá se encontram 2/3 da extensão terrestre do planeta e as maiores florestas (chamada de taiga, compreendendo vasta área da Rússia e Canadá, os dois maiores países do mundo), a natureza é capaz, momentaneamente, de se contrapor às ações humanas. Entretanto, de outubro a março o hemisfério norte sofre menor incidência solar e a fotossíntese ali declina, causando aumento na concentração de CO₂

No entanto, nem todo CO₂ emitido por conta da combustão de energia fóssil vai parar na atmosfera: cientistas¹³ avaliam que, entre 2013 e 2022, foram emitidos pela humanidade cerca de 400 gigatoneladas (Gt) de CO₂. 88% dessas emissões antropogênicas resultavam da queima

¹³ Global Carbon Project – coletivo de 121 cientistas, oriundo de 95 organizações de 17 países. Publicações são de uso aberto, revisão por pares.

de combustíveis fósseis e produção de cimento, ao passo que 12% das emissões se deviam ao desmatamento e mudança no uso do solo. Do total, 47% foram para a atmosfera, 31% foi absorvido por plantas terrestres e 26% pelos oceanos. Nestes, além da fotossíntese de algas e outros seres autótrofos, existe a absorção de CO₂ junto à superfície, que, em reação com a água, forma ácido carbônico. De fato, entre 1950 e 2020, tem havido uma diminuição contínua do pH do oceano da Terra, caindo de aproximadamente 8,15 para 8,05.

Quando uma molécula absorve energia na forma de radiação, esta energia é transformada em movimento molecular interno, causando o aumento da sua temperatura. Por isso, os gases que absorvem melhor a radiação tem papel importante no aquecimento da atmosfera.

Como a atmosfera é bastante transparente para a radiação solar (ondas curtas) e mais absorvente para a radiação terrestre (ondas longas), a atmosfera é aquecida a partir da radiação emitida pela superfície da própria Terra. As nuvens também são boas absorvedoras de radiação infravermelha (ondas curtas) e têm papel importante em manter a superfície da Terra aquecida, especialmente à noite. A figura 1.6 mostra a variação do forçamento radiativo da Terra entre 1750 e 2019, onde se percebe que existem fatores que contribuem tanto para o aquecimento quanto para o resfriamento da atmosfera, mas que resulta num aquecimento líquido da atmosfera, sendo que o gás carbônico desempenha um papel proeminente, conforme já exposto. O citado Projeto CERES, da NASA, mede desde o início do século o desequilíbrio energético da Terra (EEI), que tem crescido continuamente, mesmo com o aumento da temperatura da atmosfera, que aumenta a radiação térmica do planeta e, em tese, levaria a um equilíbrio energético. No entanto, desde o início desta década, a taxa de crescimento da temperatura e do desequilíbrio energético tem crescido a uma taxa superior à que os modelos climáticos previam e alguns cientistas creem que isto se deve à redução na emissão de aerossóis (poluentes atmosféricos, principalmente SO₂), que reflete luz solar incidente e contribui no resfriamento da atmosfera, conforme abaixo.

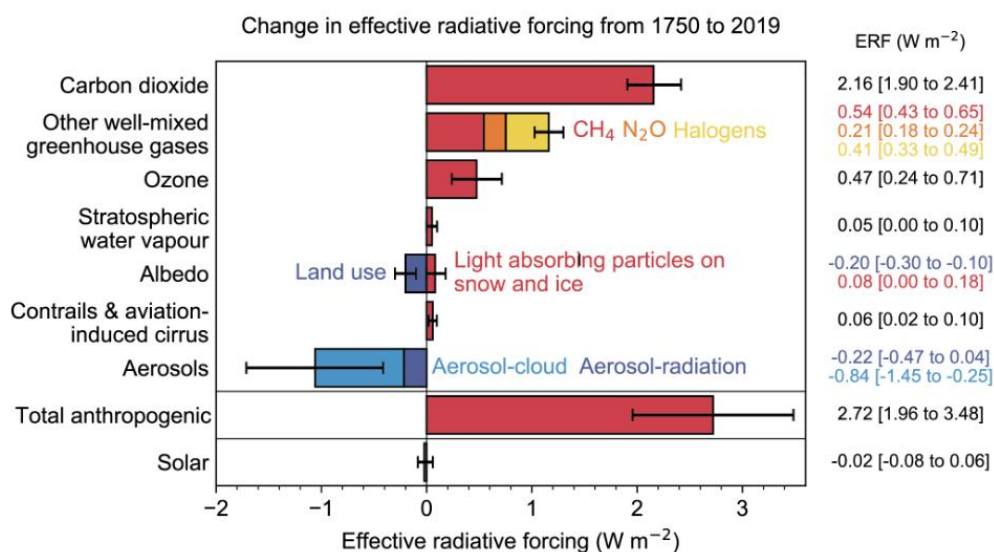


Figura 1.6 - Mudança do Forçamento Radiativo da Terra entre 1750 e 2019.

Fonte: IPCC AR6 WG1 (2021)

Historicamente, a melhora da condição humana sempre esteve intimamente relacionada a uma disponibilidade crescente de energia, daí estarmos emitindo cada vez mais GEEs. A tabela 1.3 mostra a evolução no consumo médio de energia ao longo da história da civilização.

Tabela 1.3: Consumo de energia per capita ao longo da trajetória humana.

CONSUMO DE ENERGIA PER CAPITA PARA O SER HUMANO NOS SEUS DIVERSOS ESTÁGIOS DE EVOLUÇÃO (10 ³ Kcal/dia)				
	Alimentação (incl.prod.)	Usos domésticos	Indústria e Agricultura	Transporte
Homem primitivo África Oriental, 1.000.000 A.C.	2			
Homem nômade Europa, 100.000 A.C.	3	2		
Agricultura primitiva 5.000 A.C.	4	4	4	
Agricultura avançada 1.400 A.C.	6	12	7	1
Homem industrial, Inglaterra, 1875	7	32	24	14
Atualidade EUA	10	68	91	83

Fonte: OKUNO, E. *et al.* Física para Ciências Biológicas e Biomédicas.

Fica evidenciada a urgência de se estruturar uma matriz energética mundial baseada em fontes não fósseis (renováveis e, possivelmente, nuclear). A tarefa não é simples: existe um consenso entre os analistas que a descarbonização acelerada (da matriz energética) não pode ser obtida apenas por inovação tecnológica, pois as infraestruturas não são apenas sistemas tecnológicos. Eles representam complexas teias de reforço mútuo de compromissos financeiros, sociais e políticos, cada um com uma longa história e defensores entrincheirados. Por esta razão, a mudança acelerada exigirá mudanças culturais significativas e luta política, pois o sistema energético baseado em sistemas fósseis é a base da própria civilização.

De fato, até 2020, os investimentos mundiais em energia fóssil superavam aqueles destinados às fontes renováveis. Mesmo assim, existe uma enorme pressão para uma transição energética acelerada, com a substituição das fontes fósseis de energia (carvão, petróleo, gás natural) por fontes renováveis, em sua maioria gerando eletricidade. Isto será tratado no capítulo 2.

Cabe observar como a China é chave para a discussão sobre a transição energética. Estatísticas mostram que, a partir de 2020, as energias renováveis começaram a receber mais investimentos do que as fósseis. Hoje, ela investe nesta área US\$ 850 bilhões ao ano, tanto quanto os EUA e a

União Europeia, combinados, de forma que, em 2024, as fontes renováveis já recebem o dobro do investimento em fontes fósseis.

1.3 - História da Investigação do Papel dos Gases de Efeito Estufa no Clima

O cientista e matemático francês Joseph Fourier foi a primeira pessoa a estudar a temperatura da Terra sob uma perspectiva matemática. Ele examinou as variações de temperatura entre o dia e a noite, e entre o verão e o inverno, e concluiu que o planeta era muito mais quente do que uma análise simples poderia sugerir. Em 1824, ele teorizou que a atmosfera terrestre tinha a capacidade de reter parte da energia que era devolvida ao espaço, alterando o equilíbrio térmico no planeta. Fourier calculou que seria muito mais frio do que é se a radiação recebida do sol fosse o único efeito de aquecimento. Sua ideia de que a atmosfera da Terra age como um isolante é a primeira formulação do chamado “efeito estufa”. No entanto, ele não usou esse termo, que apareceu pela primeira vez no trabalho do meteorologista sueco Nils Gustaf Ekholm, por volta de 1900. Fourier sabia que deveriam existir vários gases atmosféricos com a capacidade de causar aquecimento, mas ele não tinha como calcular o efeito estufa global, pois ele desconhecia o teor de cada um e a respectiva capacidade de aquecimento.

Em 1859, o cientista irlandês John Tyndall, intrigado com as então recentes provas de que houvera (ao menos) uma era do gelo, cogitou que gases atmosféricos poderiam ter a capacidade de bloquear a radiação solar, causando mudanças no clima. Ele conseguiu filtrar os principais gases e demonstrou publicamente que o vapor d’água, ozônio e dióxido de carbono possuíam tal capacidade, ao contrário do nitrogênio e oxigênio, principais gases atmosféricos.

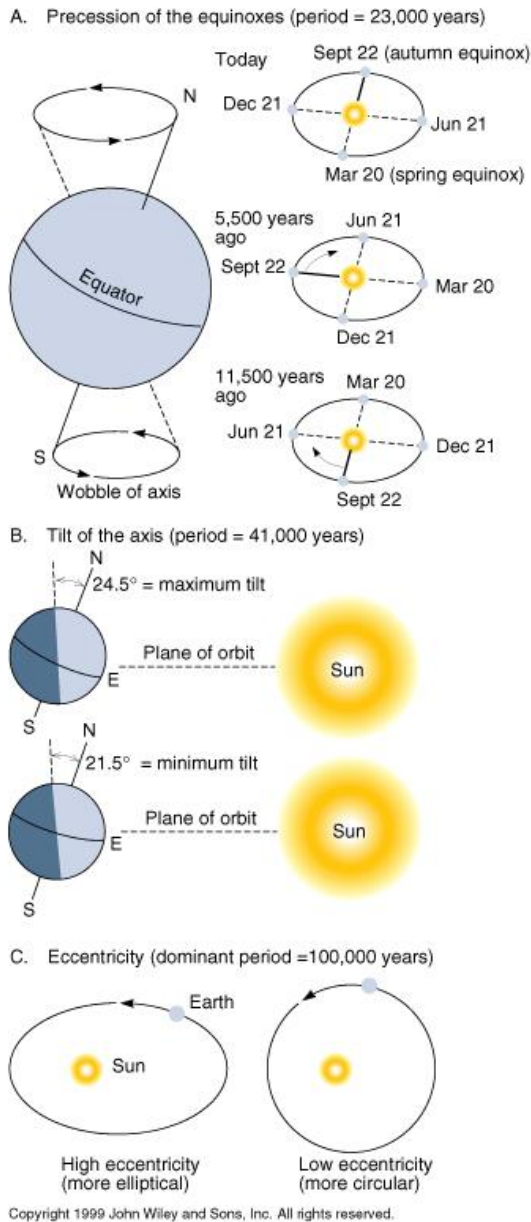
Em 1896, o físico-químico sueco Svante Arrhenius publicou um artigo intitulado *Sobre a influência do ácido carbônico no ar sobre a temperatura do solo*. Nele, ele propôs que a temperatura da Terra é regulada pela absorção e reemissão de radiação infravermelha do dióxido de carbono e do vapor de água. De posse das equações de Fourier e das medições das concentrações atmosféricas e capacidade de aquecimento de GEEs efetuada por Tyndall, Arrhenius calculou que reduzir à metade a concentração de dióxido de carbono na atmosfera (280 ppm, à época) levaria a uma redução de 5 °C na temperatura, o que levaria a Terra a uma era glacial. Quando observaram que as emissões de CO₂ estavam em crescimento, ele calculou que a duplicação da concentração do referido GEE levaria a um aumento de até 5 °C na temperatura. Esta sensibilidade da Terra quanto à variação da temperatura em função da duplicação da concentração de CO₂ na atmosfera é chamada de sensibilidade climática e é objeto de muita discussão até hoje.

O modelo de Arrhenius foi baseado nas suposições de que a atmosfera irradia a mesma quantidade de calor que recebe do espaço e que o solo transfere a mesma quantidade de calor para a atmosfera e o espaço que recebe. Modelos climáticos modernos verificaram a conclusão central de Arrhenius de que dobrar a concentração de dióxido de carbono na atmosfera fará com que a temperatura da Terra aumente entre 2 e 5 °C.

Em 1938, Guy Stewart Callendar, um engenheiro a vapor e inventor inglês, desenvolveu a teoria que ligava o aumento das concentrações de dióxido de carbono na atmosfera à temperatura global. Ele foi o primeiro a mostrar que a temperatura da Terra havia aumentado nos últimos 50 anos. Seus artigos ao longo das décadas de 1940 e 1950 lentamente convenceram alguns cientistas da necessidade de se conduzir um programa de pesquisa organizado sobre as concentrações de CO₂ na atmosfera, levando eventualmente às medições do Observatório Mauna Loa de Charles Keeling em 1958, que se mostraram essenciais para o avanço da teoria do aquecimento global antropogênico.

Em 1941, Milutin Milanković (às vezes anglicizado como Milutin Milankovitch, matemático, astrônomo, climatologista, geofísico, engenheiro civil e divulgador da ciência sérvio, reuniu 30 anos de trabalho científico sobre a teoria da radiação solar que estava espalhado em muitos livros e artigos, em um tomo intitulado "Cânone da Insolação da Terra e sua Aplicação ao Problema das Eras Glaciais", que inclui um grande número de fórmulas, cálculos e esquemas, resumindo leis universais através das quais foi possível explicar as de longo prazo da Terra causadas por mudanças na posição da Terra em comparação ao Sol, agora conhecidas como ciclos de Milankovitch. Isso explica em parte as eras glaciais que ocorreram no passado geológico da Terra, bem como as mudanças climáticas na Terra que podem ser esperadas no futuro.

A figura 1.7 mostra os três ciclos de Milankovitch: precessão, obliquidade e excentricidade.



A - Precessão: mudança na orientação do eixo rotacional da Terra. Mudanças alteram as datas do periélio e do afélio, e, portanto, aumenta o contraste sazonal em um Hemisfério e diminui em outro. Período: 23.000 anos

B - Obliquidade: mudança na inclinação do eixo da Terra. Influencia na magnitude da mudança sazonal: quando a inclinação é maior as estações são mais extremas (invernos são mais frios e verões são mais quentes) e quando é menor são mais suaves em ambos os Hemisférios. Atualmente a inclinação é de 23,5°. Período: 41.000 anos, variando entre 21,5° e 24,5°. Verões mais frios significa maior permanência de neve e gelo na altas latitudes – feedback positivo: + neve, albedo maior, maior resfriamento.

C - Excentricidade: atualmente existe uma diferença de 3% entre a maior aproximação (periélio) e o afélio. Esta diferença na distância significa 6% da insolação entre janeiro e julho. Ciclo: 90.000 a 100.000 anos. Quando a órbita está mais elíptica a diferença da insolação é da ordem de 20 a 30% entre janeiro e julho.

Figura 1.7 – Os ciclos de Milankovitch

Em meados da década de 1950, apesar do trabalho de Callendar, poucos cientistas estavam preocupados com o fato de a humanidade estar adicionando CO₂ à atmosfera pela queima de combustíveis fósseis. A sugestão de que isso mudaria o clima havia sido abandonada décadas antes por quase todos. Um argumento particularmente simples e poderoso era que o gás adicionado não permaneceria no ar. A maior parte do CO₂ na superfície do planeta não estaria na (tênue) atmosfera, mas dissolvido na enorme massa de água nos oceanos. Obviamente, não importa quanto mais gás as atividades humanas pudessem despejar na atmosfera, quase tudo acabaria enterrado com segurança nas profundezas do oceano.

Em 1957, o oceanógrafo norte-americano Roger Revelle e o químico Hans Suess publicaram um artigo na Tellus que demonstrava que os níveis de dióxido de carbono no ar estavam aumentando

devido ao consumo de combustíveis fósseis. Revelle também fez uma afirmação bombástica, numa conferência, realizada no mesmo ano no Scripps Institution of Oceanography, na Califórnia. A alcalinidade e o conteúdo de CO₂ dos oceanos flutuavam, ele explicou, "dependendo do conteúdo de dióxido de carbono atmosférico. Isso é exatamente o inverso da declaração usual de que o conteúdo de dióxido de carbono atmosférico é regulado pela quantidade no mar". Ele acrescentou uma observação de que o acúmulo de gás "pode se tornar significativo durante as próximas décadas se a combustão de combustível industrial continuar a aumentar exponencialmente".

Revelle observou que "os seres humanos estão agora realizando um experimento geofísico em larga escala de um tipo que não poderia ter acontecido no passado nem ser reproduzido no futuro". Quando ele escreveu esta frase, possivelmente a mais citada declaração na história do aquecimento global, ele não estava alertando sobre perigos futuros. Ele sentiu alguma preocupação sobre danos potenciais a longo prazo, e começou a apontar o problema em público. Mas a palavra "experimento" soou benigna e progressiva para Revelle, assim como para a maioria dos cientistas, e neste artigo ele apenas quis apontar uma oportunidade fascinante para o estudo de processos geofísicos. A atitude das pessoas em relação ao aumento do CO₂, ele escreveria em 1966, "provavelmente deveria conter mais curiosidade do que apreensão."

Em 1958, incentivado por Revelle, Charles David Keeling, também da Scripps Institution of Oceanography, começou a medir as concentrações atmosféricas de CO₂ do Observatório Mauna Loa do Havaí. Usando procedimentos analíticos rigorosos, ele revelou novas informações sobre tendências do carbono natural e o antropogênico. A precisão, exatidão e continuidade da pesquisa de Keeling ao longo de décadas forneceu uma das mais importantes ligações científicas entre a combustão de combustíveis fósseis e as mudanças climáticas globais devido ao efeito estufa. As medições de Keeling se tornaram a base para a Curva de Keeling, que é um estudo de longo prazo que continua até hoje, conforme mostrado na figura 1.5.

1.4 – Tendências de evolução da temperatura e retroalimentações do sistema climático

A temperatura média global próxima à superfície em 2023 foi de 1,45 °C (com uma margem de incerteza de $\pm 0,12$ °C) acima da linha de base pré-industrial (média entre 1850 e 1900), de acordo com o Estado do Clima Global da Organização Meteorológica Mundial 2023. Foi de longe o ano mais quente já registrado, alimentado pelo aquecimento climático de longo prazo, combinado com outros fatores, principalmente um evento natural El Niño.

A temperatura média global próxima à superfície para cada ano entre 2024 e 2028 está prevista para ser entre 1,1°C e 1,9°C maior do que a linha de base de 1850-1900, de acordo com o relatório da OMM. Ele diz que é provável (86%) que pelo menos um desses anos estabeleça um novo recorde de temperatura, superando 2023, que é atualmente o ano mais quente.

Na ciência do clima, um ponto de inflexão (“tipping point”, expressão em inglês) é um limite crítico que, quando ultrapassado, leva a grandes mudanças aceleradas e muitas vezes irreversíveis no sistema climático. Se os pontos de inflexão forem ultrapassados, eles provavelmente terão impactos severos na sociedade humana e podem acelerar o aquecimento global. O comportamento de inflexão é encontrado em todo o sistema climático, por exemplo, em camadas de gelo, geleiras de montanha, padrões de circulação no oceano, em ecossistemas e na atmosfera. Exemplos de pontos de inflexão incluem o degelo do permafrost, que liberará metano, um poderoso gás de efeito estufa, ou o derretimento de camadas de gelo e geleiras reduzindo o albedo da Terra, o que aqueceria o planeta mais rápido. O degelo do permafrost é um multiplicador de ameaças porque retém aproximadamente o dobro de carbono da quantidade que atualmente circula na atmosfera. A figura 1.8 mostra os sistemas e biomas que estão em risco de sofrerem colapso, conforme a temperatura se eleva, com destaque para a Amazônia, onde se prevê um processo irreversível de savanização, caso a temperatura média global exceda 2°C acima dos valores pré-industriais.

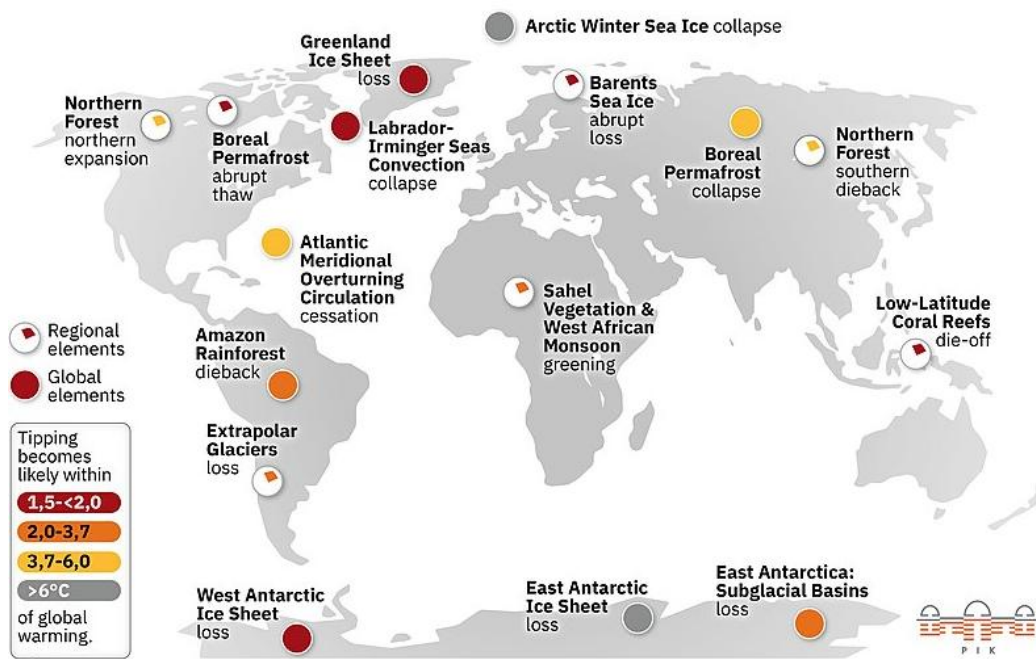


Figura 1.8 – Pontos de inflexão irreversível ao longo do Planeta

Um estudo recente da NASA descobriu que as atividades humanas são a principal causa do aumento da seca, que está além do que seria esperado das variações climáticas naturais. Essas atividades incluem:

- Mudanças no uso da terra
- Queima de florestas
- Aumento dos níveis de monóxido de carbono e dióxido de carbono

As secas recorrentes enfrentadas da Amazônia aumentam a demanda por água e torna a floresta tropical mais vulnerável à seca e ao fogo. O estudo descobriu que a seca mais significativa ocorre na região sudeste do bioma, onde ocorre a maior parte do desmatamento e da expansão agrícola. O noroeste da Amazônia, que geralmente é úmido, também sofreu secas severas.

Conseqüentemente, se essa tendência continuar, a floresta pode não ser capaz de se sustentar. À medida que as árvores morrem, elas liberam dióxido de carbono na atmosfera, o que reduziria a capacidade da Amazônia de absorver dióxido de carbono e regular o clima. De fato, existem evidências que mostram que justamente a região sudeste do bioma se tornou um emissor líquido de CO₂, ao invés de um sumidouro.

Permafrost é o solo que permanece congelado por dois ou mais anos consecutivos. Ele cobre cerca de 24% da massa de terra exposta do Hemisfério Norte - cerca de 23 milhões km². É encontrado em altas latitudes e grandes altitudes, principalmente na Sibéria, no planalto tibetano, no Alasca, no norte do Canadá, na Groenlândia, em partes da Escandinávia e na Rússia. As plataformas continentais abaixo do Oceano Ártico, que foram expostas durante a última idade do gelo, também contêm permafrost. É composto de rocha, solo, sedimentos e quantidades variadas de gelo que unem os elementos. Algum permafrost foi congelado por dezenas ou centenas de milhares de anos (Cho, 2018)

Encontrado sob uma camada de solo, o permafrost pode ter de 1 a 1.600 metros de espessura. Ele armazena os restos de plantas e animais (à base de carbono) que congelaram antes que pudessem se decompor. Os cientistas estimam que o permafrost do mundo contém 1.500 bilhões de toneladas de carbono, quase o dobro da quantidade de carbono que se encontra atualmente na atmosfera.

Quando o permafrost se aquece e derrete, libera dióxido de carbono e metano (CH₄) na atmosfera, por conta de processos de degradação microbiana. À medida que o termostato global sobe, o permafrost, em vez de armazenar carbono, pode se tornar uma fonte significativa de emissões de aquecimento do planeta.

O permafrost já está descongelando em alguns lugares, e se o problema se espalhar, os cientistas temem que ele possa iniciar um processo descontrolado de aquecimento global. Não se sabe ainda as proporções relativas de emissões de CO₂ e metano que podem resultar do derretimento do permafrost em larga escala, mas sabe-se que, a cada 10 °C de aumento na temperatura do solo, a emissão de CO₂ dobra (Cho, 2018). A figura 1.4 mostra um conjunto de lagos no Canadá formados a partir do derretimento de permafrost.



Figura 1.4: Lagos de permafrost descongelado, no Canadá

Fonte: S. Juvetson -<http://blogs.ei.columbia.edu/2018/01/11/thawing-permafrost-matters/>

Kong et Wang (2017) estimaram que, se as temperaturas globais subirem 1,5 °C acima dos níveis de 1861 (0,4 °C a mais do que hoje), o derretimento do permafrost poderá liberar de 68 a 508 gigatoneladas de carbono, resultando num aquecimento adicional que pode resultar em impactos climáticos catastróficos. Embora um Ártico mais quente possa suportar mais plantas, e as plantas absorvam CO₂ via fotossíntese, o novo crescimento é projetado para compensar apenas cerca de 20% da liberação de carbono do permafrost (Cho, 2018).

Ironicamente, o aquecimento atmosférico ocorrido ao longo dos últimos cem anos, em adição à melhoria no bem-estar geral, tem levado a um expressivo crescimento no estoque de aparelhos de ar-condicionado. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2018), o número destes aparelhos deverá saltar de 1,6 bilhões de unidades (em 2016) para 5,6 bilhões, em 2050. Isto se deve ao fato de que nos países mais quentes do planeta, na África, América Latina e Oriente Médio, onde 2,8 bilhões de pessoas habitam, apenas 8% da população possui tal sistema de refrigeração. De acordo com a agência, a expansão projetada fará com que as emissões de GEE devido à termoelectricidade produzida por usinas a carvão e GN para alimentar o parque de refrigeradores suba quase 1 bilhão de toneladas de CO₂ até 2050, mesmo com expressiva redução prevista na intensidade de emissões: em função de ganhos de produtividade. Ou seja, quanto mais calor, maior as emissões associadas à climatização, realimentando o processo de aquecimento global.

Existem outros processos em curso, que não envolvem diretamente emissões de GEE, mas que agravam substancialmente o aquecimento do planeta e que não estão sendo computados nos modelos climáticos. A figura 1.5 mostra como o declínio da superfície congelada do Ártico tem sido consistente, desde o início das medições via satélite, em 1979. Acontece que, enquanto o gelo marinho reflete cerca de 70% da radiação solar incidente, a superfície escura do oceano absorve 90% da energia que entra, aquecendo a massa de água e, conseqüentemente, agravando o derretimento da superfície gelada. A redução média da superfície de gelo desde o início das medições excede 2 milhões de km², fazendo com que esta realimentação positiva (redução da reflexão da radiação solar) tenha um impacto de aquecimento atmosférico equivalente às emissões do setor de transporte do globo.

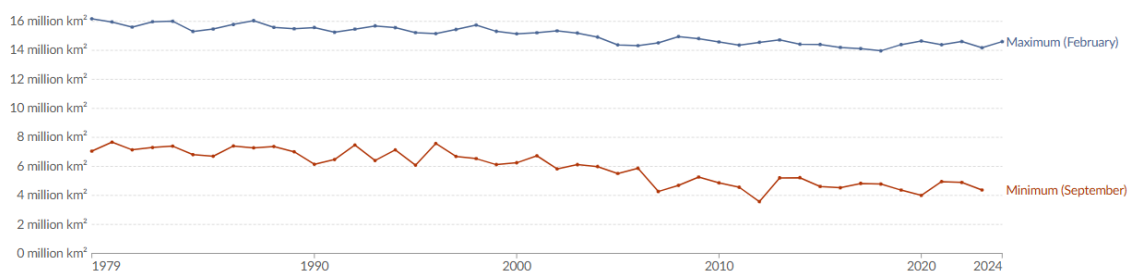


Figura 1.5: Evolução na extensão de área congelada do Ártico, 1979-2024

Fonte: Our World in Data 2024

1.5 – Aspectos econômicos, sociais e políticos das Mudanças Climáticas

As conseqüências do aquecimento global são grandes demais para serem ignoradas. Com isso, para reverter essa tendência, os governos de diversos países vêm discutindo ações que resultem na estabilização e, posteriormente na redução da emissão de gases de efeito estufa para atmosfera.

Estudos econômicos recentes estimam que os danos causados pelas mudanças climáticas podem chegar a 12% redução do PIB global com 1°C de aumento da temperatura média global em relação à média na era pré-industrial, limite que já foi excedido. Caso a temperatura exceda 3 °C estima-se até 50% de redução do PIB global, com colapso na produção, capital e consumo, até 2100, quando este limite já deverá ter sido alcançado. Um dos autores disse que o poder de compra, que é o quanto as pessoas conseguem comprar com seu dinheiro, já seria 37% maior do que é agora sem o aquecimento global observado nos últimos 50 anos. É importante frisar que existem outros estudos que estimam impactos menos graves por conta dos distúrbios climáticos extremos causados pelo aquecimento da atmosfera.

A Identidade Kaya é uma fórmula matemática que expressa o nível total de CO₂ como o produto de quatro fatores: População humana (P), PIB per capita (G/P), Intensidade energética (por unidade de PIB), Intensidade de carbono (emissões por unidade de energia consumida). Ela é

uma forma concreta da equação $I = PAT$, que relaciona fatores que determinam o nível de impacto humano no clima, conforme visto.

$$F = P \times \frac{G}{P} \times \frac{E}{G} \times \frac{F}{E}$$

Figura 1.6 – Fórmula da Identidade KAYA

A Identidade Kaya é útil para calcular emissões com base em dados mais facilmente disponíveis, como população, PIB per capita, energia por unidade de PIB e emissões por unidade de energia. Ela pode ser usada para identificar elementos da economia global que podem ser alterados para reduzir as emissões e ajudar na tomada de ações para reduzir as emissões de CO₂ relacionadas com a atividade humana.

Ao se questionar a possibilidade de se operar um esforço inédito, em escala mundial, para reduzir continuamente o consumo de energia, de forma a atingir a meta de zerar as emissões do setor energético, de forma a garantir a estabilização de temperatura, a resposta é complexa. É comum analistas apresentarem cenários róseos quanto à sustentabilidade no uso de recursos energéticos para a demanda futura da humanidade, apontando a crescente eficiência das sociedades em gerar riquezas com um uso decrescente de energia.

Este indicador é a intensidade energética, uma medida de quanta energia é usada para produzir uma quantidade específica de produção ou atividade. É calculada dividindo a quantidade de energia usada por uma unidade de produção econômica, como o PIB, ou seja, expresso em unidade de energia/unidade de riqueza gerada (MJ/\$). Uma intensidade energética menor significa que menos energia é usada para produzir um produto ou serviço. A intensidade energética é um fator-chave nas metas globais de descarbonização e crescimento econômico. Ela pode ser afetada por vários fatores, incluindo: melhorias de eficiência, mudanças estruturais da economia, fatores comportamentais, clima e mix de fontes de energia.

De fato, a figura 1.7 indica que, a intensidade energética global de fato caiu cerca de 50%, entre 1965 e 2023. A intensidade de carbono (emissões CO₂e/\$) caiu ainda mais um pouco, pelo aumento na participação das fontes renováveis nas cadeias energéticas, o que reduz a intensidade de carbono (emissões CO₂e/MJ) da matriz energética. No entanto, ela também mostra claramente que, mais do que o aumento populacional, foi o aumento vertiginoso da riqueza do mundo o principal fator pelo aumento também vertiginoso das emissões de GEE observado neste período.

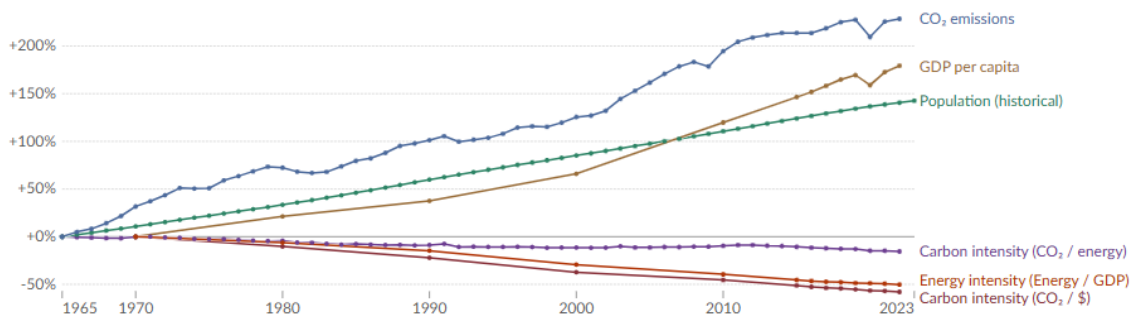


Figura 1.7 - Evolução global das emissões de CO₂, população, PIB per capita, intensidade de carbono e intensidade energética, entre 1965 e 2023.

Fonte: Our World in Data 2024

A figura 1.8 mostra como o consumo energético aumenta claramente em função do aumento na renda das famílias, em particular aqueles de alta qualidade, como eletricidade e derivados de petróleo. Por outro lado, famílias de baixa renda usam recorrentemente lenha para cocção, algo impensável para as classes mais abastadas, que utilizam gás de botijão (GLP) ou gás natural encanado em suas residências.

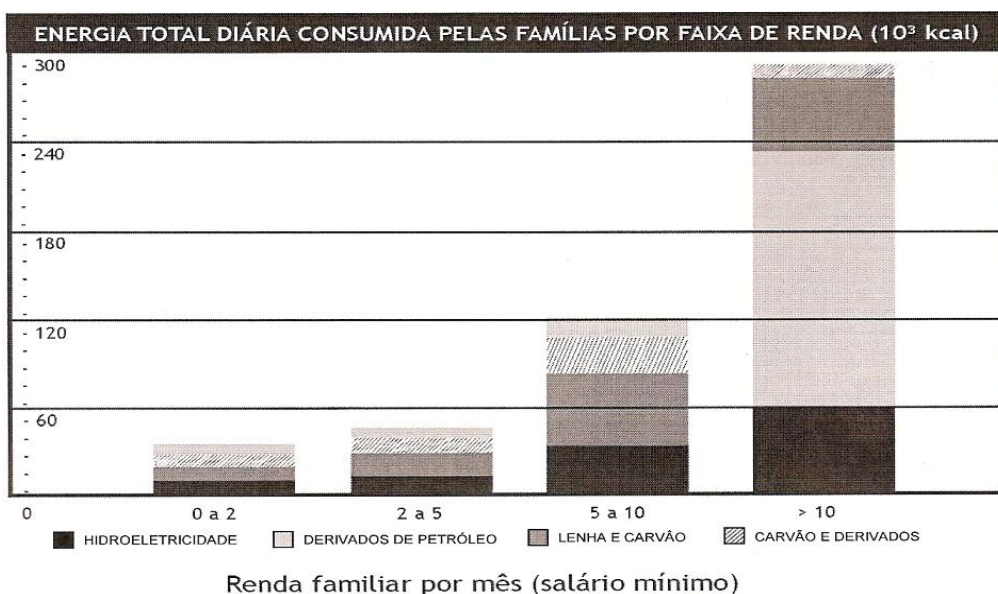


Figura 1.8 – Energia total diária consumida pelas famílias por faixa de renda

Para aumentar as barreiras econômicas à inserção rápida das energias renováveis na matriz mundial, cabe notar que, em 2024, 75% dos subsídios globais dos países do G20 visam subsidiar todas as formas de energia fóssil, três vezes mais do que é destinado às energias renováveis.

Do ponto de vista de articulação política, a pedra fundamental para chefes de estado ratificarem a preocupação com o aquecimento global do clima se deu em junho de 1992, na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92), realizada no Rio de

Janeiro. Ao final, foi negociada e assinada a Convenção-Quadro das Nações Unidas para a Mudança do Clima (UNFCCC) por 175 países mais a União Europeia.

O objetivo principal da UNFCCC foi criar instrumentos e mecanismos, promover a gestão sustentável e demais condições que possibilitem a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera em um nível que evite ou minimize os impactos nocivos das mudanças climáticas, propondo-se assim, a elaborar uma estratégia global para proteger o sistema climático para as gerações futuras.

A UNFCCC reconhece que a responsabilidade histórica e presente pelas atuais concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera é dos países desenvolvidos, devendo tomar a iniciativa no combate à mudança do clima; que a prioridade primeira de países em desenvolvimento deve ser o seu próprio desenvolvimento social e econômico, e que a sua parcela de emissões globais totais deve aumentar à medida que eles se industrializem; que estados economicamente dependentes de carvão e petróleo enfrentarão dificuldades se a demanda de energia mudar; e que países com ecossistemas frágeis, como pequenos países insulares e de terreno árido, são especialmente vulneráveis aos impactos previstos da mudança do clima.

Tanto os países desenvolvidos quanto os em desenvolvimento assumiram um certo número de compromissos ao tornarem-se Partes da UNFCCC. Entre eles:

- Submeter para apreciação informações (inventários) sobre as quantidades de gases de efeito estufa que eles emitem, por fontes, e sobre seus "sumidouros" nacionais (processos e atividades que absorvem gases de efeito estufa da atmosfera, em especial, florestas e oceanos).
- Desenvolver programas nacionais para a mitigação da mudança do clima e adaptação a seus efeitos.
- Fortalecer a pesquisa científica e tecnológica e a observação sistemática do sistema climático e promover o desenvolvimento e a difusão de tecnologias relevantes.
- Promover programas educativos e de conscientização pública sobre mudança do clima e seus efeitos prováveis.

Os países desenvolvidos assumiram compromissos adicionais. Os mais importantes são:

- Adotar políticas destinadas a limitar suas emissões de gases de efeito estufa e proteger e aumentar seus "sumidouros" e "reservatórios" de gases de efeito estufa. Também submeterão informações detalhadas sobre seu progresso.
- Transferir recursos tecnológicos e financeiros para países em desenvolvimento além da assistência que já seja por eles oferecida, e apoiar os esforços desses países no cumprimento de suas obrigações sob a UNFCCC.
- Ajudar países em desenvolvimento que sejam particularmente vulneráveis aos efeitos adversos da mudança do clima para fazer frente aos custos de adaptação.

Para que os objetivos da UNFCCC fossem atingidos, foi criada a Conferência das Partes (COP): formado pelos países que ratificaram a UNFCCC e organizações internacionais como UNEP, UNCTAD, WMO, OCDE, IEA e ONGs credenciadas. O objetivo da COP é promover e revisar a implementação da UNFCCC, revisar os compromissos existentes periodicamente, divulgar novas pesquisas científicas e verificar a eficiência dos programas nacionais de mudanças climáticas. Em 2025, será realizada a COP 30, em Belém do Pará.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) foi criado em 1990, conjuntamente pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio-Ambiente (PNUMA) para avaliar periodicamente a ciência, os impactos e aspectos socioeconômicos das mudanças climáticas, bem como as opções de adaptação e de mitigação. O IPCC fornece, a pedido, informações científicas e técnicas para a Conferência das Partes (COP) da UNFCCC e seus órgãos.

1.6 – Impactos com a Mudança do Clima no Mundo

As evidências obtidas por meio de observações de todos os continentes e dos oceanos mostram que muitos sistemas naturais estão sendo afetados pelas mudanças climáticas regionais, principalmente pelo aumento de temperatura.

Em dezembro de 2015, no âmbito da COP 21¹⁴, foi assinado o Acordo de Paris. O documento, assinado por autoridades de 195 países, detalha os compromissos assumidos por cada país, no sentido de reduzir suas emissões futuras de gases de efeito estufa (GEE), de forma a minimizar os impactos das mudanças climáticas. A meta principal do acordo é impedir que, ao longo do século XXI, a temperatura média do planeta Terra exceda 2 °C¹⁵ àquela observada antes da Revolução Industrial, uma vez que inúmeros testemunhos paleoclimáticos indicam que tal patamar jamais foi observado desde que *o homo sapiens* surgiu no planeta, colocando a trajetória humana em terreno incerto. Ademais, houve um compromisso formal de se envidar esforços para limitar o aumento da temperatura média global do planeta a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, um patamar apoiado por inúmeros cientistas, ONGs e países insulares, mais propensos a sofrerem impactos com a elevação do nível do mar. Hoje, a maioria dos cientistas concordam que o limite em 2 °C poderá incorrer em consequências quase catastróficas, de forma que o limite de 1,5 °C passou a ser a meta a ser aspirada.

Cada país signatário do Acordo de Paris explicitou as medidas voluntárias que pretende implantar para reduzir ao máximo as respectivas emissões de GEE, em geral, no horizonte até

¹⁴ COP 21 – 21ª Conferência das Partes, evento anual promovido pela UNFCCC – Convenção Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas.

¹⁵ Segundo Artaxo (2014b), o “limite” de 2 °C inclui danos importantes em vários aspectos das mudanças globais e não pode ser considerado “seguro”. “O limiar foi estruturado sem que se levasse em conta possíveis mudanças não lineares, irreversíveis ou abruptas no sistema climático terrestre, tais como desestabilização da capa de gelo da Groenlândia ou Antártica, ou alterações na circulação termohalina”.

2030. Estes compromissos atendem pelo nome de Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, em inglês). Especificamente, o Brasil assumiu o compromisso de reduzir em 37% a emissão de GEEs para o conjunto da economia brasileira até 2025, em relação a 2005, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030.

É importante frisar que, mesmo com o cumprimento de todas as NDCs assumidas por todos os países, o esforço global de redução nas emissões constitui apenas 1/3 do que seria necessário para se evitar o rompimento da barreira de 2 °C (PNUMA, 2017).

De fato, como será visto no capítulo 2, mais de 80% da matriz energética do planeta ainda proveem de recursos fósseis (IEA, 2024). Em contraste, a participação de fontes renováveis na Matriz Energética Brasileira no mesmo ano alcançou 49% do total, uma das mais elevadas do mundo.

De acordo com o 5º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013), as emissões acumuladas de CO₂ controlam a magnitude do aquecimento atmosférico global de longo prazo, facilitando a identificação das quotas de emissões que podem limitar o aquecimento global aos limites indicados pelo Acordo de Paris. Especificamente, para que haja 66% de chances de que o limite de temperatura de 2 °C não seja alcançado, a sociedade somente poderá, doravante, emitir um total de 800 bilhões de toneladas (Gt) de CO₂.

Ao enquadrar a questão em termos de emissões cumulativas máximas, o relatório do IPCC mostra que medidas como a adoção de metas de curto prazo de redução de emissões, ou a redução de emissões de um país para compensar os compromissos assumidos por outro (princípio dos mecanismos de flexibilização, como o MDL) tem menor impacto do que se supunha. O que mais importa é o acumulado das emissões de CO₂, uma vez que, de um montante emitido, p.ex. no início da era industrial, 15 a 40% dele pode permanecer na atmosfera por mais de 1.000 anos (IPCC, 2013).

O ano de 2023 foi o ano mais quente desde que os registros globais começaram em 1850, com 1,45 °C acima da média do período pré-industrial (1850-1900). Os 10 anos mais quentes no registro de 174 anos ocorreram todos durante a última década (2014–2023). Agora é praticamente certo que 2024 — um ano pontuado por ondas de calor intensas e tempestades mortais — será o mais quente do mundo já registrado, de acordo com projeções do serviço climático europeu. As temperaturas médias globais ao longo do ano estão a caminho de terminar mais de 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, o que tornaria 2024 o primeiro ano civil a quebrar essa marca simbólica, estabelecida no Acordo de Paris, em 2015.

Existe uma tendência clara de aumento no número de eventos climáticos extremos, como pode ser visto na figura 1.9. É importante frisar que parte do aumento na contagem dos eventos se deve à crescente atenção que o tema tem recebido.

Are extremes becoming more frequent?

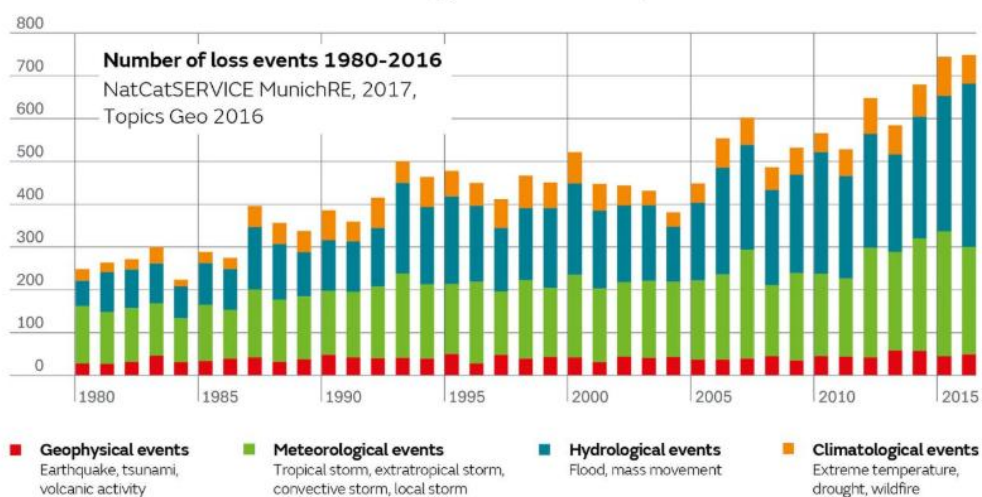


Figura 1.9 – Evolução do número de eventos extremos no planeta

Fonte: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/climate-and-climate-change/climate/what-affects-climate/extreme-weather>

O setor de energia elétrico continua a ser consumidor dominante de combustíveis fósseis do mundo e a principal fonte de emissões de CO₂. Ironicamente, este setor já sofre com as consequências das interrupções dos sistemas de transmissão de energia elétrica devidas à distúrbios climáticos (queda de galhos, vendavais, tempestades), como mostra a figura 1.10:

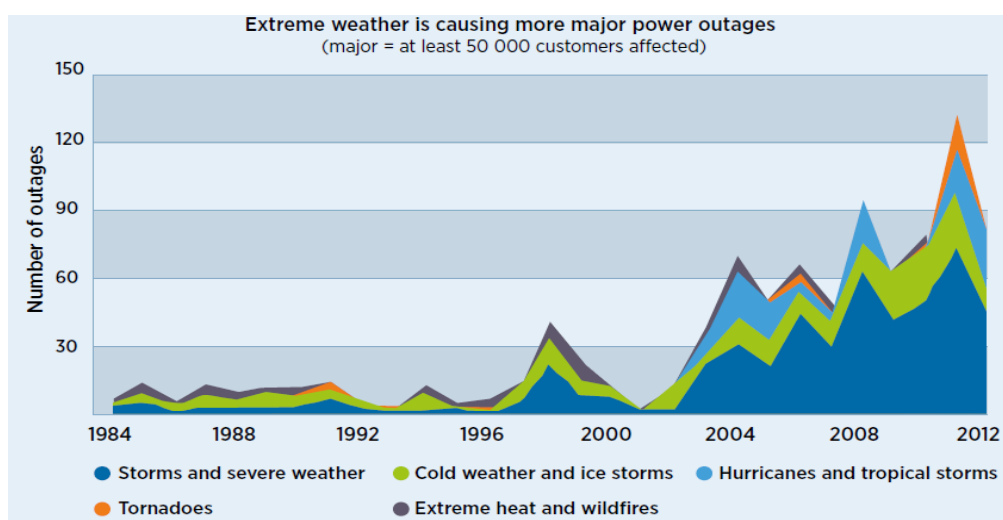


Figura 1.10: Evolução no número de Rupturas de grande porte no Fornecimento de Energia Elétrica nos EUA, devido à distúrbios climáticos:

Fonte: IRENA_ Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus (2015)

Os últimos relatórios publicados pelo IPCC elencam os seguintes impactos previstos, por conta das mudanças climáticas:

Neve, Gelo e Solo Congelado

- Aumento do volume e do número dos lagos glaciais;
- Aumento da instabilidade do solo nas regiões de *permafrost* (solo e subsolo permanentemente congelados);
- Mudanças em alguns ecossistemas árticos e antárticos, inclusive nos biomas do gelo marinho, bem como nos predadores no alto da cadeia alimentar.

Sistemas Hidrológicos

- Aumento do escoamento superficial e antecipação da descarga de pico durante a primavera em muitos rios alimentados por geleiras e neve;
- Aquecimento de lagos e rios em muitas regiões, afetando a estrutura térmica e a qualidade da água.

Sistemas Biológicos Terrestres

- Antecipação da época dos eventos da primavera, como a emissão de folhas, migração dos pássaros e posturas de ovos;
- Deslocamento, em direção aos polos e para cima, da distribuição das espécies vegetais e animais;
- Tendência de esverdeamento precoce da vegetação na primavera, relacionada com épocas de cultivo mais longas provocadas pelo aquecimento recente.

Sistemas Biológicos Marinhos e de Água Doce

- Maior quantidade de algas e zooplânctons em lagos de latitude e altitude altas;
- Deslocamentos da distribuição e migrações antecipadas dos peixes nos rios;
- A absorção de carbono antrópico desde 1750 fez com que os oceanos ficassem mais ácido, com uma redução média do pH de 0,1 unidade.

Outros efeitos das mudanças climáticas regionais no meio ambiente têm surgido, embora seja difícil identificar muitos deles em razão da adaptação e dos fatores não-climáticos que os influenciam.

- Nas latitudes mais altas do Hemisfério Norte (HN) tem havido uma antecipação do plantio das culturas na primavera e alterações nos regimes de perturbação das florestas por causa de incêndios e pragas;

- Alguns aspectos da saúde humana, como a mortalidade relacionada com o calor na Europa (veja quadro a frente), vetores de doenças infecciosas em algumas áreas e pólen alérgico nas latitudes altas e médias do Hemisfério Norte;
- Algumas atividades no Ártico (por exemplo, caça e transporte na neve e no gelo) e em áreas alpinas de elevação mais baixa (como os esportes de montanha).

As recentes mudanças climáticas e variações do clima estão começando a afetar muitos outros sistemas naturais e humanos. Contudo, segundo o IPCC, os impactos ainda não se tornaram tendências estabelecidas. Exemplos:

- Os assentamentos nas regiões montanhosas correm maior risco de inundações por ruptura dos lagos glaciais ocasionada pelo derretimento das geleiras;
- Na região do Sahel (África), as condições mais quentes e secas provocaram uma redução da duração da época de cultivo, prejudicando as culturas. No sul da África, as estações secas estão mais longas e a precipitação mais incerta;
- A elevação do nível do mar e o desenvolvimento humano estão contribuindo juntos para as perdas das várzeas e manguezais costeiros e aumentando os danos causados pelas inundações do litoral em muitas áreas.

A melhor ferramenta científica para projetar cenários prováveis de alterações climáticas para o futuro são os modelos matemáticos do sistema climático global, que levam em conta de forma quantitativa (numérica) o comportamento dos compartimentos climáticos (atmosfera, oceanos, criosfera (áreas com gelo e neve), vegetação, ciclos biogeoquímicos etc.) e suas interações. Esses modelos permitem simular prováveis cenários de evolução do clima para vários cenários de emissões dos GEE. Porém, há duas grandes fontes de incertezas associados a estes modelos.

A primeira é que não se sabe precisamente a trajetória futura das emissões dos GEEs na atmosfera, que depende de decisões humanas sobre o caminho social, econômico e ambiental desejado e que de fato venha a ser implementado. A segunda fonte de incerteza advém do fato que os modelos matemáticos são representações imperfeitas da natureza: não à toa, diferentes modelos climáticos diferem substancialmente em suas projeções para o clima do futuro, dado o mesmo cenário de evolução das concentrações de GEE na atmosfera. Para minimizar estas incertezas, costuma-se utilizar vários cenários de emissões de GEE e diferentes modelos climáticos, elaborados por diversas instituições de pesquisa em todo o mundo.

Caminhos consistentes com 1,5°C de aquecimento acima dos níveis pré-industriais podem ser identificados sob uma série de suposições sobre crescimento econômico, desenvolvimentos tecnológicos e estilos de vida. Limitar o aquecimento a 1,5°C implica atingir emissões líquidas zero de CO₂ globalmente por volta de 2050 e reduções profundas simultâneas nas emissões de gaseses não-CO₂, particularmente metano. Todos os cenários propostos por cientistas consideram mandatário o uso de técnicas de remoção de CO₂ atmosférico para que tal meta seja atingida, visto o progresso contínuo nas emissões, vinculado ao progresso econômico.

Foi visto neste capítulo que a mudança climática da Terra é o principal desafio ambiental da humanidade e que o uso de fontes fósseis de energia é o principal responsável pelas emissões antropogênicas de GEE. Por isso, há alguns anos cientistas vocalizam a necessidade de a humanidade efetuar uma transição energética, de tal forma que as fontes “limpas” substituam as fósseis no menor prazo possível.

Capítulo 2 – Transição Energética e as novas fontes renováveis

Foi visto no capítulo 1 que o uso crescente de fontes fósseis de energia constitui na principal fonte de emissões de GEE no planeta. Desta forma, é necessário um mergulho mais profundo nas questões que levam a humanidade a consumir estes recursos energéticos mesmo com as consequências devastadoras associadas a tal atividade.

2.1 - Definições, formas, fontes e conceitos relativos à energia

A palavra energia deriva da palavra grega ἐνέργεια (energeia), que aparece pela primeira vez na obra *Ética*, de Nicômaco (IV século AC).

O conceito de energia surgiu a partir da ideia de vis viva (força viva), postulada por Leibniz e definido como o produto da massa de um objeto e sua velocidade ao quadrado. Ele acreditava que o vis viva total fosse conservada. Para explicar o arrefecimento devido ao atrito, Leibniz afirmava que o calor consistia no movimento aleatório das partes constituintes da matéria - uma opinião partilhada por Isaac Newton, apesar de que seria mais de um século até que este conceito fosse amplamente aceito.

Em 1802, em um ciclo de palestras para a Royal Society, Thomas Young foi o primeiro a usar o termo "energia" em seu sentido moderno, em vez de vis viva. Na publicação dessas palestras, ele escreveu: "o produto da massa de um corpo para o quadrado da sua velocidade pode apropriadamente ser denominado sua energia". Ele definiu energia como "a capacidade de realizar trabalho". Trabalho, na ciência física, é "o produto de uma força pelo deslocamento que ela provoca, no sentido em que é aplicada". Gustave-Gaspard Coriolis descreveu "energia cinética", em 1829, em seu sentido moderno, e em 1853, William Rankine cunhou o termo "energia potencial".

A física utiliza o conceito existente, de origem socioeconômica, decorrente da noção de mobilizar as forças da natureza para efetuar tarefas de transformação da matéria. Observando em nossa volta, percebe-se facilmente que a energia está presente em todas as atividades da moderna sociedade. É a energia que possibilita o movimento dos automóveis, a iluminação das casas e cidades, o funcionamento da indústria, o aquecimento ou resfriamento artificial dos ambientes, a produção dos bens e serviços etc. A energia constitui-se no fator fundamental para a satisfação de quase todas as necessidades do homem. Dessa forma, importa o domínio da técnica de conversão da energia, ou seja, o controle do processo de obtenção da energia na forma que melhor se ajuste às necessidades exigidas pela sociedade (Energia térmica, mecânica, química, radiante e eletrônica), a partir da disponibilidade natural dos recursos.

Existem diversas formas de manifestação da energia. Uma se transforma em outra, adquirindo diferentes manifestações que, unificadas num mesmo conceito, permite medir suas diferentes atividades por uma mesma grandeza, numa única escala, a ser visto a frente.

- Mecânica: ventos, corrente de um rio (cinética), queda d'água (potencial)
- Gravitacional: atração entre as grandes massas, como os corpos celestes.
- Eletromagnética: luz, corrente elétrica.
- Elástica: compressão de uma mola.
- Térmica: calor (energia cinética entre as moléculas).
- Química: coesão entre os átomos
- Nuclear: coesão entre os prótons e nêutrons dos núcleos atômicos

Apesar de suas múltiplas formas, a energia se origina de apenas três tipos de interações fundamentais da natureza: gravitacional, eletromagnética e nuclear.

A energia solar, a mais importante para a humanidade, provém da fusão termonuclear, que transforma átomos de hidrogênio em hélio. No processo, uma pequena quantidade de massa de hidrogênio se converte em uma grande quantidade de energia (calor e luz).

Dessa fonte de energia derivam outras, manifestadas em diversas formas, como mostra a figura 2.1. Ela indica que, além da energia nuclear do sol que irradia para a Terra, outra fonte de energia é fruto da força gravitacional, oriunda de movimentos cósmicos terrestres e de interações com a Lua, redundando nos aproveitamentos de energia cinética hídrica dos oceanos, como marés, correntes submarinas, ondas. Por fim, existe ampla (do ponto de vista de escala das demandas energéticas atuais) disponibilidade de recursos geotérmicos, originada pela alta temperatura do núcleo da Terra, mantida pela desintegração radioativa de núcleos atômicos instáveis. Neste caso, a força que atua no sentido de empreender uma reação exotérmica (na qual a liberação de energia) é a chamada força nuclear fraca.

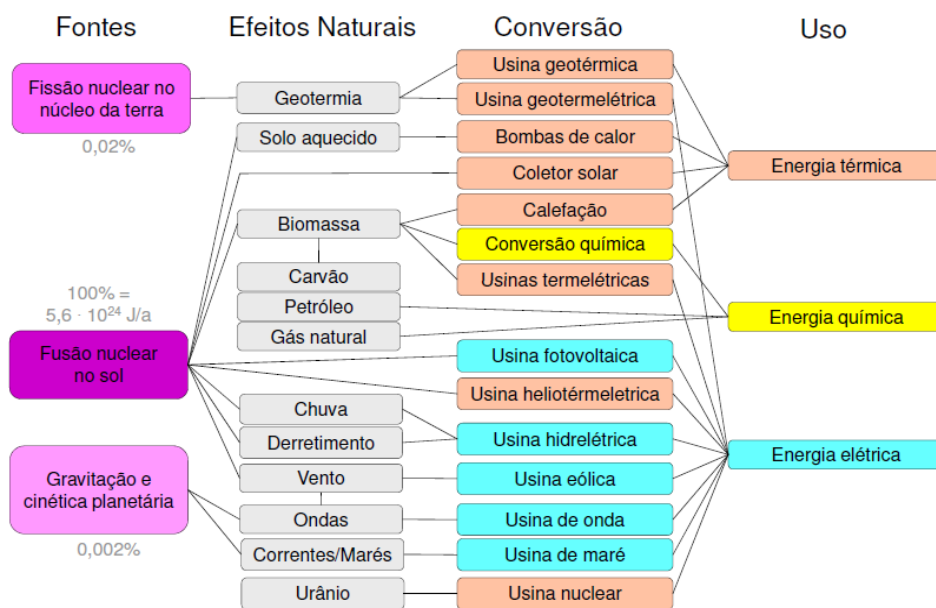


Figura 2.1 – Fontes, efeitos naturais, conversores e usos de energia

O balanço energético da Terra, conforme ilustrado na figura 2.2, é tal que o fluxo de entrada é cancelado pelo fluxo de saída, de forma a manter o planeta em uma temperatura média constante. A recente elevação de temperatura observada na atmosfera terrestre decorre de ações humanas, que tem elevado continuamente a concentração de gases de efeito estufa (GEE). Este excesso de GEEs vem causando um desbalanço energético no planeta, ao reduzir o fluxo de radiação térmica de saída e aumentando a temperatura da atmosfera do planeta, conforme visto no capítulo 1. Cabe notar que o fluxo energético que atinge a Terra proveniente do Sol é cerca de 10.000 vezes mais intenso do que a potência consumida por toda a espécie humana, de forma que não há, absolutamente, nenhum impedimento técnico para que a sociedade sobreviva, em algum ponto no futuro, às custas exclusivamente de energia solar.

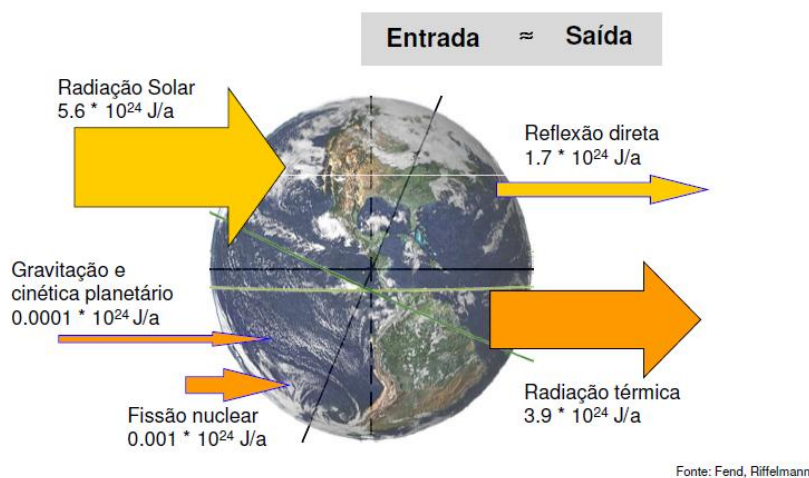


Figura 2.2 - Balanço Energético do Planeta Terra

O processo de desenvolvimento humano esteve sempre relacionado com a evolução das técnicas de exploração e uso das fontes de energia dispostas na natureza e na construção de complexos sistemas de conversão das fontes de energia para garantir o funcionamento das sociedades.

O corpo humano é o mais complexo sistema conversor de energia do qual o homem faz uso. A digestão proporciona a conversão da energia química, presente nos alimentos, em calor, energia muscular e cerebral. Ao aproveitar as formas de energia externa ao seu corpo, o ser humano dispõe de duas configurações básicas de conversão de energia:

- Os conversores orgânicos (uso do trabalho animal para produção de energia mecânica, entre outros)
- Os conversores inorgânicos, que utilizam como fonte os recursos energéticos dispostos na natureza (roda d'água, energia do vento, máquinas elétricas, motores dos automóveis, dentre outros).

Os recursos energéticos, matéria de que alimenta os conversores, são encontrados na natureza em duas formas distintas: Recursos Renováveis e Não-renováveis.

Recursos renováveis – São aqueles que na teoria são inesgotáveis, uma vez que estão associados a um ciclo de fluxo contínuo. De forma geral, os recursos renováveis estão presentes em todo o planeta, o que permite o seu uso de maneira descentralizada (energia hidráulica, solar, biomassa, eólica).

Recursos não renováveis – São aqueles que, uma vez consumidos, não podem ser recuperados, ou seja, apresentam-se em quantidades limitadas (petróleo, gás, carvão, urânio).

Um relevante conceito, relacionado à disponibilidade, é o de energia de fluxo e de estoque. Energia de fluxo é aquela que não pode ser estocado (solar, eólica, hidráulica). Já Energia de estoque pode ser estocado (gás, petróleo, etc.). Outro conceito importante, relacionado à finitude dos recursos energéticos é o de energia exaurível e inexaurível. Uma fonte de Energia exaurível é passível de esgotamento, ao passo que uma de Energia inexaurível não é. Cabe atentar que a biomassa se enquadra no primeiro caso, ao passo que os combustíveis fósseis são, na prática, inexauríveis, pois será economicamente cada vez mais proibitivo recuperá-los, à medida que os recursos se tornem escassos.

Outra distinção comum entre recursos energéticos é o de fontes convencionais e fontes alternativas. Comumente estas designações são confundidas, com fontes sujas (e não renováveis) e limpas (e renováveis), respectivamente. No fundo, Energia convencional é uma fonte que é economicamente dominante em determinado local, ao passo que a Energia alternativa tem custo maior, em geral demandando suporte governamental para se estabelecer no mercado.

Bem mais simples do que a conceituação de energia é a sua percepção, uma vez que os seres humanos são dotados de faculdades capazes de identificar a realização das distintas formas de energia. Os olhos registram a presença da energia luminosa. O sistema auditivo reage à energia sonora. O sistema nervoso acusa a energia térmica no ambiente ou em matéria próxima, bem como a exposição à energia elétrica.

Existem outras manifestações energéticas que não são diretamente percebidas por meios fisiológicos, e assim torna-se necessário o desenvolvimento de instrumentos que verifiquem sua presença e determinem seus efeitos. Enquadram-se nesta categoria "extra-sensorial" a energia química, a energia nuclear e a energia eletromagnética, quando fora da faixa de frequências que os seres humanos podem perceber.

Cinco são os fenômenos através dos quais a energia se manifesta:

- Calor (Energia térmica)
- Trabalho (Energia mecânica)

- Combustão (Energia química)
- Radiação (Energia radiante)
- Fluxo de elétrons (Energia elétrica)

A energia presente nestes fenômenos físicos pode ser transformada de uma forma para outra, como pode ser visto na figura 2.3. Entretanto, toda transformação energética acarreta em uma perda de energia útil, que é convertida em calor.

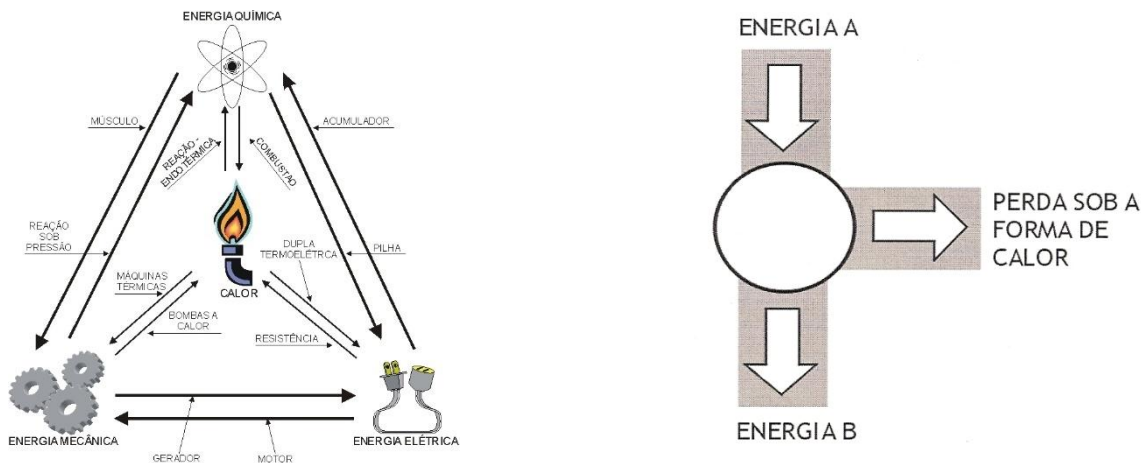


Figura 2.3 - Formas de Energia, Processos de Conversão e Perdas sob a forma de calor

De um modo geral, a atividade humana necessita captar uma fonte de energia da natureza e transformá-la numa forma em que possa ser utilizada, na quantidade suficiente para a produção de bens e serviços demandados pela sociedade. As conversões da energia na natureza têm dois aspectos relacionados à quantidade e à qualidade da energia.

O 1o Princípio da Termodinâmica, conhecido como a Lei da Conservação de Energia, estabelece que a energia não pode ser criada nem destruída. Dentro de um sistema fechado (por exemplo, a Terra ou o sistema solar), a quantidade total de energia não se altera, embora as formas em que ela se apresenta possam mudar.

Complementarmente à conservação da quantidade total de energia, a Física mostra que há qualidades diferentes de energia. Assim, determinadas formas de energia são mais nobres que outras. Quando duas partículas em movimento se chocam, a energia total do sistema antes e depois do choque é a mesma, porém, a energia cinética total das duas partículas após o choque é menor, pois uma parte dessa energia se transformou em calor devido ao atrito no choque, de modo que essa energia, em forma de calor, não está mais disponível para mover as partículas. De modo geral, todas as formas de energia podem ser transformadas em calor.

O 2o Princípio da Termodinâmica informa que a transformação inversa, do calor para outras formas de energia só é possível em parte: jamais podemos converter toda a energia térmica de que dispomos em trabalho.

Dentre as várias formulações, este princípio pode ser enunciado da seguinte forma: “Na transformação de calor em trabalho, o sentido é sempre do estado térmico mais alto para o mais baixo, e sempre com rendimento menor do que 100%”. Portanto, nessa conversão de forma, há sempre uma perda de energia útil.

Este princípio complementa a Lei da Conservação, afirmando que, se a quantidade total de energia se mantém durante suas transformações, por outro lado sua qualidade decai. Em outras palavras, existe um aumento contínuo da entropia, ou do grau de “desordem” do universo, conceito criado para quantificar a degradação da energia.

Para entender a degradação energética ocorridos nos processos de conversão, um importante conceito é de energia primária e secundária. Energia primária é aquela cuja fonte utiliza o energético tal qual é encontrada na natureza. Já a energia secundária é toda aquela cuja fonte utiliza o energético somente após algum tipo de transformação.

A Oferta Interna de Energia de um país compreende todo o consumo final de energia, das pessoas e das empresas, e, ainda, a energia gasta nos centros de transformação (produção de outras formas de energia a partir de fontes primárias), como nas refinarias, destilarias de álcool, centrais de geração de eletricidade etc. O que sobra é a

Uma cadeia energética é um conjunto de atividades necessárias para que alguns dos tipos de energia cheguem onde queremos usá-la, atividades relacionadas à obtenção de energia primária, sua transformação em energia secundária nos centros de transformação e seu transporte de um ponto a outro o seu consumo final. Uma característica das sociedades modernas envolve a utilização de cadeias energéticas (petrolífera, gasífera, carbonífera, elétrica etc.) muito complexas, as quais apresentam estreitas relações em muitos processos tecnológicos, como pode ser visto nas figuras. As figuras 2.4 e 2.5, que apresentam o fluxo da cadeia produtiva de setor elétrico e petrolífero, respectivamente.

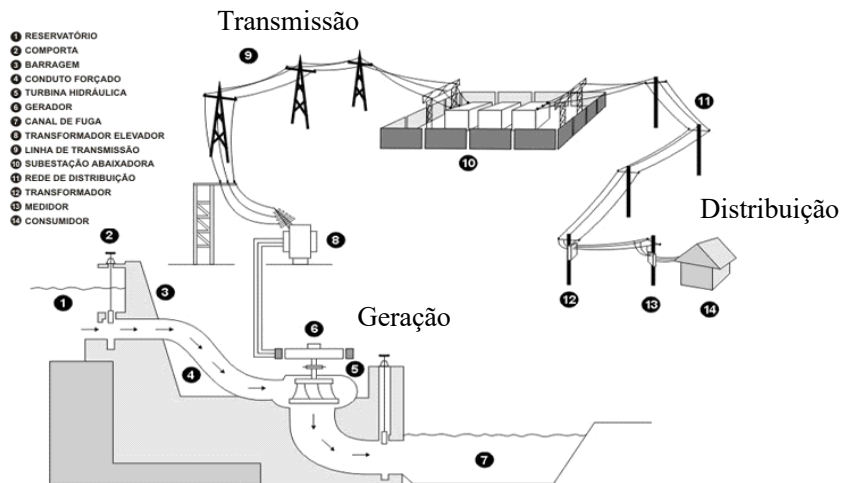


Figura 2.4 – Fluxo da cadeia produtiva do setor elétrico

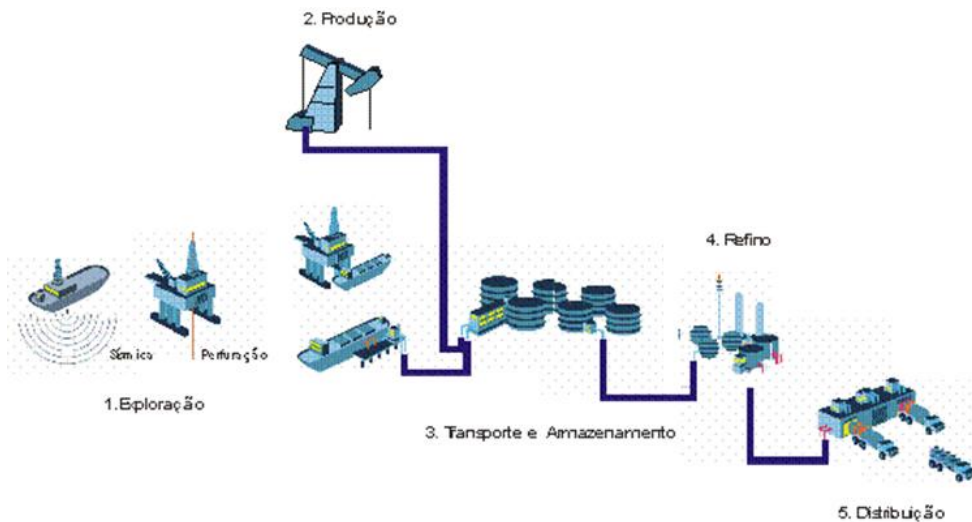


Figura 2.5 – Fluxo da cadeia produtiva do petróleo

O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia interna contida nele. Quanto mais alto for o poder calorífico, maior será energia contida. Um combustível é constituído sobretudo de hidrogênio (H) e carbono (C). O poder calorífico de H é de 120 MJ/kg, enquanto que o de C é de 34 MJ/kg. Por isso, quanto mais rico em H for o combustível, maior o seu poder calorífico, conforme a tabela 2.1 que segue. Há dois tipos:

- Poder calorífico superior (PCS) - É a quantidade de calor produzido por 1kg de combustível, quando este entra em combustão, em excesso de ar, e os gases da descarga são resfriados de modo que o vapor de água neles seja condensado.
- Poder calorífico inferior (PCI) - É a quantidade de calor produzida por 1kg de combustível, quando este entra em combustão com excesso de ar e gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando assim que ela seja condensada.

Tabela 2.1 – Poder Calorífico Superior e Poder Calorífico Inferior de combustíveis

Combustível	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Carvão (Antracito)	34,1	33,3
CO	10,9	10,9
Metano (CH ₄)	55,5	50,1
Gás Natural	55	49,7
Propano	48,9	45,8
Gasolina	46,7	42,5
Diesel	45,9	43

O PCI sempre é menor do que o PCS, pois não inclui duas formas de energia térmica liberadas durante a combustão:

- A energia necessária para vaporizar a água contida no combustível;
- A energia para formar água a partir do hidrogênio contido nas moléculas do combustível e posterior vaporização da mesma.

Ou seja, para combustíveis que não contenham H na sua composição, o PCS é igual ao PCI, pois não há formação de água. Consequentemente, não há energia gasta na sua vaporização.

A biomassa é um tipo de combustível que se apresenta quase sempre com algum teor de água. A tabela 2.2 mostra a redução que ocorre ao PCI de uma fonte de biomassa (a maior parte possui PCS variando entre 18 e 22 MJ/kg), conforme o teor de água presente. Sistemas de secagem, sejam eles naturais ou não (p. ex. troca de calor com condensador de uma turbina) podem aumentar substancialmente o seu potencial energético.

Tabela 2.2 - PCI de biomassa em função do PCS e do teor de umidade

Teor de umidade (%)	PCS = 18 MJ/kg	PCS = 20 MJ/kg	PCS = 22 MJ/kg
	PCI (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
0	16,79	18,79	20,79
5	15,84	17,74	19,64
10	14,89	16,68	18,49
15	13,94	15,64	17,34
20	12,98	14,58	16,18
25	12,03	13,53	15,03
30	11,08	12,48	13,88
35	10,12	11,42	12,72
40	9,17	10,37	11,57
45	8,22	9,32	10,42

50	7,27	8,27	9,27
----	------	------	------

2.2: Um breve histórico da evolução no uso de energia

O sucesso da trajetória humana ao longo da História foi obtido na medida em que o homem dominou sucessivamente o uso de fontes cada vez mais nobres de energia.

O próprio homem corresponde a um motor de 100 W de potência, necessitando uma entrada de 2 mil kcal/dia de energia bioquímica (combustão dos alimentos) para que o coração e os músculos realizem suas atividades de trabalho mecânico.

Por volta de 100 mil anos A.C., estima-se que o homem nômade, extrativista, consumia 5 mil Kcal/dia.

Com o advento da agricultura e a sedentarização das sociedades primitivas, o homem começa a utilizar-se da energia solar, captada através da fotossíntese, para o cultivo de seus alimentos. Logo passou a empregar também a energia dos animais que conseguiu domesticar, para arar a terra, transporte de cargas e pessoas. Assim, por volta de 5 mil anos A.C., o homem utilizava cerca de 10 mil Kcal/dia, ou seja, 5 vezes a energia necessária para mantê-lo vivo.

Durante a Idade Média, a escravidão foi substituída pelo regime de servidão feudal e as principais fontes de energia continuaram as mesmas: lenha, tração animal e força muscular humana, além da energia solar na agricultura.

Gradativamente, surgiram importantes inovações que aumentaram o rendimento da captação e uso da energia: a charrua e a atrelagem dos animais pelo peitoral elevaram a eficiência do trabalho mecânico; expandiu-se o uso de moinhos de água e de vento.

Na transição para a Idade Moderna, duas inovações foram marcantes: na navegação, modificações nos tipos e arranjos das velas tornaram a energia eólica mais importante que os remos; e a descoberta da pólvora pelo Ocidente, com seu uso nas armas de fogo. O uso de energia era da ordem de 26 mil kcal/dia.

A grande ruptura na produção baseado essencialmente no uso de energia renovável se deu na Revolução Industrial, com o advento da máquina a vapor: o consumo energético per capita explodiu, atingindo 77 mil Kcal/dia por volta de 1875 e a quantidade de energia mobilizada por minuto cresceu tremendamente, com os requisitos de potência bem mais elevados das máquinas a vapor.

Começava assim a grande transição para os combustíveis fósseis (da lenha pelo carvão mineral): nos Estados Unidos, a participação da lenha no consumo energético total caía de 90% para 20% entre 1850 e 1900, enquanto no mesmo período o carvão subia de 10% para 70%.

Surge então o motor a combustão interna (ciclo Otto e Diesel), que associado à utilização de derivados do petróleo como a gasolina e o óleo diesel acentua exponencialmente o ganho de potência, o consumo de energia e a dependência dos combustíveis fósseis.

Ao longo do século XX, ocorre uma nova transição da base energética, desta vez do carvão para o petróleo, cuja importância no consumo total de energia nos EUA passa de 1% em 1875 para 70% em 1975. Neste ano, os EUA, símbolo da sociedade industrial de consumo, usava em média 243 mil kcal/dia por habitante, representando um salto de ordem de grandeza com relação ao consumo energético médio do homem antes da Revolução Industrial.

A partir de 1960 o petróleo (abundante e barato do Oriente Médio) suplanta o carvão em sua contribuição no balanço energético mundial. Entretanto, em 1973/74 e 1979/80, épocas do primeiro e segundo choque do petróleo, fica patente a inconsistência do crescimento ilimitado do consumo de energia, diante da perspectiva da progressiva escassez e encarecimento do petróleo. Houve então um aumento da conscientização dos impactos ambientais do uso da energia, especialmente o petróleo.

Energia nuclear, desenvolvida a partir da tecnologia militar, despontou, nos anos 1950, como pretensa fonte de energia barata e abundante. No entanto, os altos riscos associados ao seu uso não concretizam essa perspectiva.

Solução adotada: aumento da eficiência do uso da energia, com esforços para sua racionalização, o que por si só também contribuiu para minimizar os impactos ambientais do sistema energético. Entre 1973 e 1986, as economias dos países industrializados da OCDE cresceram sem aumento do consumo do petróleo. Como será visto adiante, isto foi causado pela substituição maciça do óleo combustível pelo carvão e, principalmente, o gás natural, na geração elétrica.

Apesar do crescente sucesso na captura e processamento dos recursos energéticos, cabe lembrar que, em 2020, existiam 760 milhões de pessoas sem acesso a eletricidade no mundo. Sendo que a África Subsaariana abriga três quartos deste universo.

O número de pessoas sem acesso à eletricidade aumentou em 2022 devido aos impactos da pandemia de Covid-19 e da invasão da Ucrânia pela Rússia. O acesso à eletricidade é definido como ter uma fonte de eletricidade utilizável que pode fornecer iluminação básica e carregar um telefone ou alimentar um rádio por quatro horas por dia

O Conselho Mundial de Energia define sustentabilidade energética em três dimensões fundamentais - segurança energética, equidade energética e sustentabilidade ambiental. Estes três objetivos constituem um "trilema", o que implica complexas ligações entre atores públicos

e privados, governos e reguladores, fatores económicos e sociais, os recursos nacionais, as preocupações ambientais e comportamentos individuais.

De toda forma, existem inúmeros estudos que vinculam bem-estar (p. ex., IDH) com disponibilidade energética, por isso a questão da segurança energética ser um tema crescentemente discutido por governos e sociedades, gerando interesse inédito nos meios de comunicação. O que está claro é que existe forte correlação entre crescimento econômico e consumo de energia elétrica, como pode ser observado na figura 2.6:

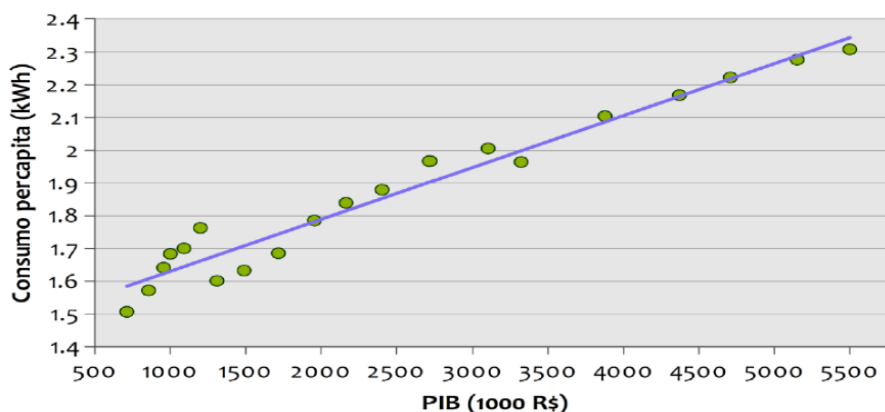


Figura 2.6 - Variação do consumo de energia elétrica versus PIB Brasileiro, entre 1995 e 2015
Fonte: INPE – Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª Edição (2017), a partir de dados da EPE e IBGE

2.3 – Impactos do Sistema Energético ao Meio Ambiente

Em toda interação humana com o ambiente, mesmo nas sociedades mais simples, há três elementos principais em jogo. Eles podem ser ligados numa fórmula introduzida por Paul Ehrlich e John Holden, nos anos 1960:

$$\text{Impacto} = \text{População} \times \text{Afluência} \times \text{Tecnologia}$$

Mais explicitamente, o impacto ambiental é o produto da população, multiplicado pelo consumo por pessoa (afluência), multiplicado pela quantidade de recursos necessários, ou resíduos criados, ao produzir cada unidade de consumo (tecnologia).

Os autores concluíram que, em vários momentos históricos, diferentes elementos foram os mais importantes. O aumento da área arável em muitas partes da África até por volta de 1980, e o desmatamento que o acompanhou, foi impulsionado principalmente pelo crescimento populacional. Houve pouco aumento no consumo de produtos agrícolas por pessoa, e pouca melhoria nos rendimentos. Em contraste, o aumento dramático na produção humana de clorofluorcarbonos a partir da década de 1940 foi devido esmagadoramente à introdução de uma nova tecnologia. Essa complexidade é melhor visualizada usando uma abordagem de

sistemas, que ajuda a superar a polarização encontrada nas visões mais proeminentes das ligações população-ambiente.

A abordagem de sistemas tem duas diferenças principais das abordagens convencionais. Ele não se concentra em um único fator, mas em vez disso, cria tantos fatores potenciais quanto possível, e não vê o impacto humano no meio ambiente simplesmente como uma via de mão única. Há feedback. Mudanças no meio ambiente têm impacto no bem-estar humano.

A equação IPAT é a base para a análise inicial da causa da insustentabilidade ambiental. É a questão básica por trás de do modelo de simulação World3, usado num livro marco da história ambiental, *The Limits to Growth*, em 1972. Entretanto, alguns críticos entendem que esta equação é apropriada para identificar causas intermediárias e é disso que você precisa para identificar o problema, mas não para chegar às causas raiz.

As atividades do setor energético em suas etapas de exploração, transformação, distribuição e uso, incorrem em significativos impactos sobre o meio ambiente natural e antrópico. Os danos mais expressivos estão relacionados com as emissões de GEES, poluentes atmosféricos locais, contaminação dos meios aquáticos e terrestres, e à geração de resíduos. Acrescenta-se, ainda, o esgotamento dos recursos naturais, a produção de ruídos, os impactos visuais e os efeitos negativos à biodiversidade.

O aumento das concentrações das emissões dos poluentes atmosféricos tem repercutido em danos ambientais de âmbito global, regional e local. Dentre estes: a intensificação do efeito estufa, depleção da camada de ozônio e a chuva ácida. A produção de energia a partir da queima de biomassa e, principalmente, combustíveis fósseis, lança na atmosfera uma gama de compostos contaminantes que atuam no meio ambiente contribuindo para aumento na incidência de doenças cardiorrespiratórias, a acidificação da vegetação, solo e recursos hídricos.

Segundo a OMS, oito em cada dez habitantes de áreas urbanas vivem em locais onde a concentração de poluentes atmosféricos excedem as diretrizes da própria instituição. Não à toa, a poluição aérea é quarto mais importante fator de risco associado à vida humana em todo o mundo, depois de alta pressão, riscos alimentares e fumo. Estimativas atribuem 6.5 milhões de mortes prematuras anualmente à poluição atmosférica.

O material particulado (PM, sigla em inglês) é uma mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas, sólidas e líquidas, suspensas no ar ou na água. Ele é o poluente mais perigoso à saúde humana. Ele pode incluir poeira, areia, fuligem, fumaça, maresia, pólen, cinzas vulcânicas e gotículas líquidas. O PM10 inclui partículas com menos de 10 microns de diâmetro (poeira, maresia, pólen, mofo) e o PM2.5, partículas com menos de 2,5 microns de diâmetro (fuligem, fumaça, cinzas vulcânicas). Este é particularmente perigoso, pois partículas com menos de 10 microns de diâmetro conseguem penetrar nos alvéolos dos pulmões e até na corrente sanguínea.

Outros poluentes incluem os óxidos de nitrogênio (NOx -compreendendo o NO e NO2); óxidos sulfúricos (SOx – compreendendo o SO e SO2); monóxido de carbono (CO); compostos orgânicos voláteis (VOC, sigla em inglês), sendo que um deles, o metano (CH4), também é um gás de efeito estufa. O ozônio (O3), naturalmente encontrado na estratosfera, é formado próximo à superfície a partir da reação de NOx e VOCs, na presença de luz solar. Em altas concentrações, é um poluente.

Um sério problema ambiental que assolou os EUA e a Europa nos anos 1970 e 1980 foram as chuvas ácidas. Chuva ácida é chuva ou qualquer outra forma de precipitação que seja anormalmente ácida, o que significa que tem níveis elevados de íons de hidrogênio (pH baixo). A maioria das águas, incluindo água potável, tem um pH neutro entre 6,5 e 8,5, mas a chuva ácida tem um nível de pH menor que este e varia de 4–5 em média. Quanto mais ácida for a chuva ácida, menor será seu pH. A chuva ácida pode ter efeitos nocivos em plantas, animais aquáticos e infraestrutura. A chuva ácida é causada por emissões de dióxido de enxofre e óxido de nitrogênio, que reagem com as moléculas de água na atmosfera para produzir os ácidos sulfúricos e nítrico, respectivamente.

A figura 2.7 mostra como o petróleo (particularmente, o óleo diesel) é a principal fonte de NOx. O carvão é a principal fonte de SOx, ao passo que a queima de biomassa em ambientes domésticos é a principal fonte global de emissões de material particulado (PM, sigla em inglês).

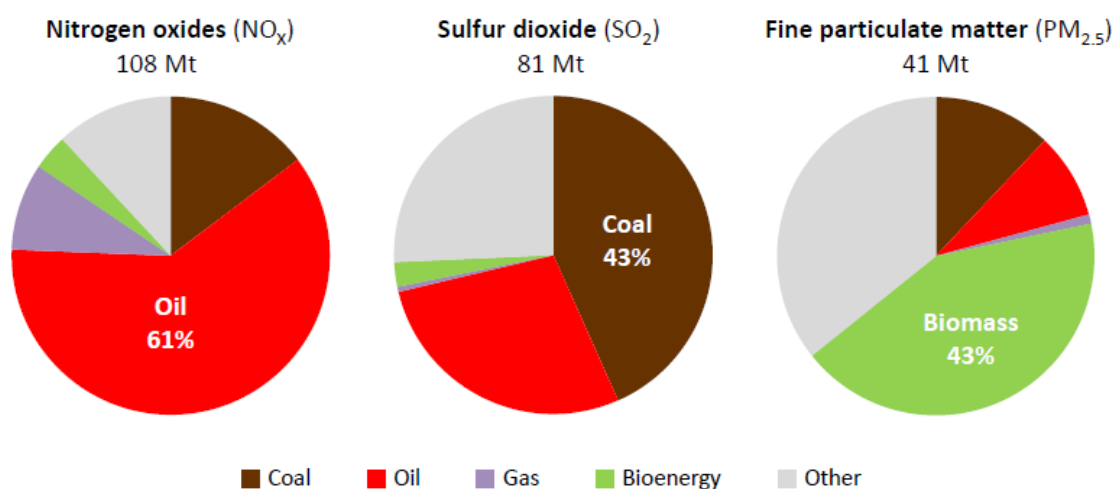


Figura 2.7 - Montantes Globais e Fontes de Emissões dos Principais Poluentes Atmosféricos, em 2015

Fonte: IEA – Energy and Air Pollution (2016)

Segundo também a IEA, em 2014, a produção de energia primária e energia elétrica foi responsável por aproximadamente 3% de todo o uso consuntivo¹⁶ global de água e 10% de todo o uso não-consuntivo¹⁷ de água. Tecnologias de geração termelétrica necessariamente utilizam água no resfriamento do vapor utilizado para movimentar as turbinas, mas possuem uma ampla faixa de pegada hídrica (volume de água por unidade de energia produzida). A figura 2.8 mostra como tecnologias como energia eólica e solar FV não demandam água em seus processos de geração elétrica.

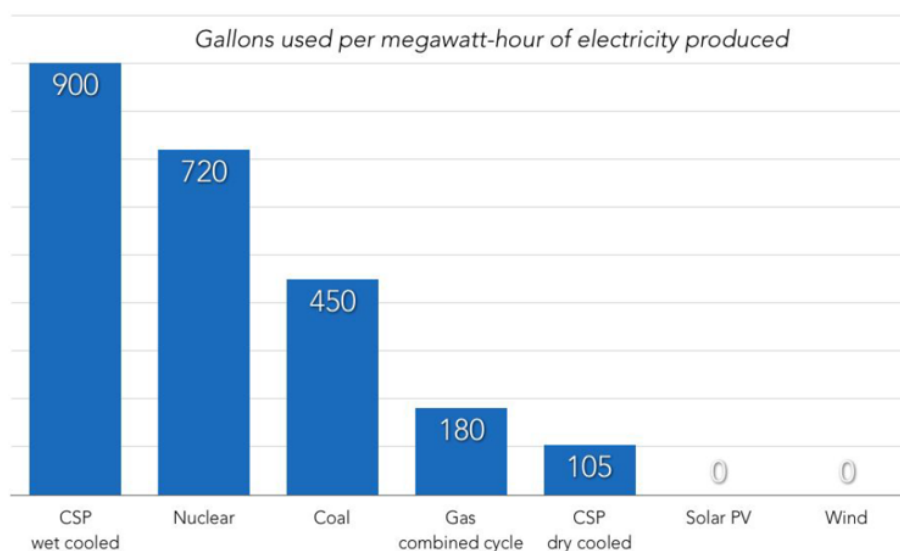


Figura 2.8 – Consumo Específico de Água de Tecnologias de Geração Elétrica

Fonte: IEA – Energy and Water Nexus (2016)

Os grandes aproveitamentos hidroelétricos geram impactos ambientais significativos. Embora localizados, podem causar fortes transtornos em seu entorno. Os impactos ambientais deste tipo de aproveitamento diferem bastante e dependem dos locais onde ocorrem.

A tecnologia nuclear utilizada para produzir eletricidade, apresenta problemas quanto ao destino dos resíduos radioativos gerados. Este fato inquieta enormemente a humanidade devido ao alto grau de periculosidade que estes resíduos representam, bem como o elevado risco de acidentes durante a operação das unidades geradoras. A desativação das instalações e o armazenamento dos resíduos radioativos são problemas que ainda não estão completamente resolvidos, o que restringe a expansão desta tecnologia.

¹⁶ Usos consuntivos da água: referem-se aos usos que retiram a água de sua fonte natural diminuindo suas disponibilidades, espacial e temporalmente. Ex: dessedentação de animais, irrigação, abastecimento público, processamento industrial, etc.

¹⁷ Usos não-consuntivos da água: referem-se aos usos que retornam à fonte de suprimento, praticamente a totalidade da água utilizada, podendo haver alguma modificação no seu padrão temporal de disponibilidade. Exs: navegação, recreação, piscicultura, hidroeletricidade, etc.

O atual cenário mundial marcado por uma extrema dependência da produção e uso de energia de origem fóssil, e de empreendimentos ligados a cadeia energética que imputam elevados impactos ao ambiente natural, tem levado a sociedade industrial a redescobrir os fluxos energéticos com base nos recursos naturais renováveis, e nos processos de produção, em escalas harmonizadas com a vida humana e capacidade de suporte dos ecossistemas.

Entre os economistas, existem aqueles que acreditam que a expansão no uso de energia é necessidade *sine qua non* para o desenvolvimento de uma sociedade, quando esta passa de uma economia agrária para uma economia industrial, que gera mais riquezas e empregos do que o setor primário, mas demanda, em geral mais energia. Entretanto, quando uma economia passa por uma transição para o setor terciário (Serviços), as demandas energéticas podem até se reduzir. De fato, as emissões dos EUA e da União Europeia têm declinado ao longo da última década, parcialmente em função de um processo de desindustrialização (exceto a Alemanha), mas as emissões da China subiram, por atrair investimentos industriais do Ocidente. Alguém tem que fabricar os produtos que o planeta consome.

Considerando a complexidade envolvendo as cadeias energéticas, existe a necessidade de avaliar o impacto das mesmas, sob a ótica de uma análise de ciclo de vida (ACV). Cada produto tem um ciclo de vida que se estende desde a extração ou produção de matérias-primas até sua disposição final. Entre estes estágios, existe a fabricação, armazenamento, transporte e uso do produto. Cada uma dessas etapas requer insumos - materiais e energia, podendo produzir resultados potencialmente nocivos ao ar, água e terra.

Análise do Ciclo de Vida (ACV) é um método para categorizar e quantificar essas entradas e saídas do "berço ao túmulo" para avaliar o impacto ambiental líquido de um produto, material ou serviço. Ou seja, considera os aspectos ambientais em todas as fases da sua vida, estabelecendo vínculos entre esses aspectos e categorias de impactos potenciais, ligados ao consumo de recursos naturais, à saúde humana e à ecologia. A figura 2.9 ilustra o ciclo de vida de um produto e todas as etapas que necessitam ser consideradas numa ACV.



Figura 2.9 – Ciclo de vida de um produto

Ciclo de vida é sinônimo de visão sistêmica ou holística. O ACV é uma técnica que abre o ciclo de vida de um produto em pequenas partes para poder entendê-lo, sob o ponto de vista do que se quer analisar (por exemplo, emissões de GEE, foco principal aqui). Neste processo, todo o fluxo de entrada e saída de materiais (balanço material e energético) deve ser analisado e medido, verificando seus efeitos sobre o ar, a água e o solo. Os materiais usados e a formação de substâncias intermediárias, até a decomposição final do produto, também devem ser avaliados, além da comparação do seu impacto ambiental com o de outros produtos, incluindo-se a destinação final dos resíduos e dos materiais recuperáveis ou recicláveis em cada alternativa considerada. Segue na figura 2.10 um diagrama que representa as etapas e fluxos considerados num inventário de ciclo de vida, fase do ACV que consiste na coleta de dados sobre as entradas e saídas associadas ao sistema em consideração.



Figura 2.10 – Inventário de Ciclo de Vida

Dada a gravidade da crise climática, foi desenvolvido o conceito de “pegada de carbono”, um ACV com ênfase nas emissões de GEE. A sua definição mais aceita é: "a medida da quantidade total de CO₂ e outros GEEs de uma população definida, sistema ou atividade, considerando todas as fontes, sumidouros e de armazenamento dentro do limite espacial e temporal da população do sistema, ou a atividade de interesse. Calculado como dióxido de carbono equivalente (CO₂e), utilizando o correspondente potencial de aquecimento global (GWP) de 100 anos”.

Utilizando metodologias de ACV, o IPCC publicou um relatório especial sobre fontes renováveis de energia e sobre sua capacidade de mitigar as emissões da matriz energética global. A figura 2.11 mostra a pegada de carbono de diferentes tecnologias de geração de energia elétrica. Nesta, fica claro como, mesmo levando-se em conta as emissões indiretas (àquelas associadas à cadeia produtiva), as energias renováveis têm um claro papel estratégico no processo de mitigação das emissões de GEE, possibilitando um desacoplamento entre aumento na demanda de energia (sempre fortemente correlacionado com aumento de renda) e emissões de GEE. A mesma publicação também mostra como a energia de biomassa, seja para a geração de combustíveis líquidos para transporte, calor ou eletricidade, é uma alternativa de mitigação das emissões de GEE dos combustíveis fósseis. No entanto, não se levou em conta as emissões relacionadas ao uso da terra necessária para a instalação de empreendimentos renováveis, que leva à mudança de estoques de carbono da biomassa e solo. Esta questão torna-se cada dia mais crucial, visto a finitude das terras para os mais diversos fins.

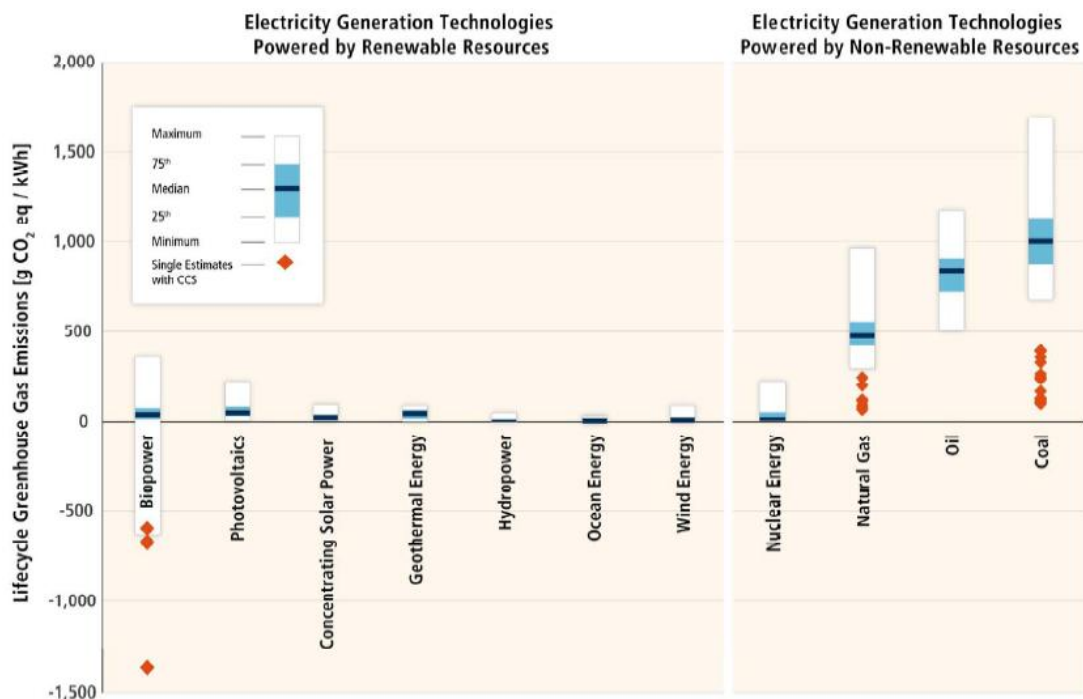


Figura 2.11 - Emissões de GEE (ACV) de energias renováveis vs. fósseis para geração elétrica

Fonte: IPCC – Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (2012)

Em 1973, ocorreu a Guerra do Yon Kipur, no qual Israel derrotou uma coalizão de países árabes, liderados pelo Egito. Em resposta ao apoio da Europa e dos EUA à Israel, foi deflagrada a primeira crise do petróleo, causado por embargo da OPEP¹⁸. Após a imposição do embargo, o preço do barril de petróleo quadruplicou em 1974. Como resultado, os Estados Unidos experimentaram sua primeira escassez de combustível e o primeiro aumento significativo nos preços da gasolina desde a Segunda Guerra Mundial.

A Europa, importadora de petróleo, também sofreu um baque econômico com o embargo. Em função do despreparo das autoridades ante esta crise, o OCDE¹⁹ criou a Agência Internacional de Energia (IEA, em inglês), com a missão de prestar informações sobre o setor energético global, para assistir os países membros na tomada de decisão de políticas energéticas. Ela se tornou a principal referência mundial no que toca estatísticas e projeções energéticas. A figura 2.1 de uma publicação da citada agência mostra a grande inércia dos sistemas energéticos mundiais com relação à dependência das energias fósseis. Em 1973, 87% da energia primária do mundo provinha de recursos fósseis, liderados pelo petróleo. O grande esforço empreendido por países importadores em reduzir a dependência deste energético, por conta da crise resultou, 50 anos depois, num maior consumo de carvão, gás natural (GN) e energia nuclear, recursos que paulatinamente substituíram o óleo combustível de petróleo na geração elétrica.

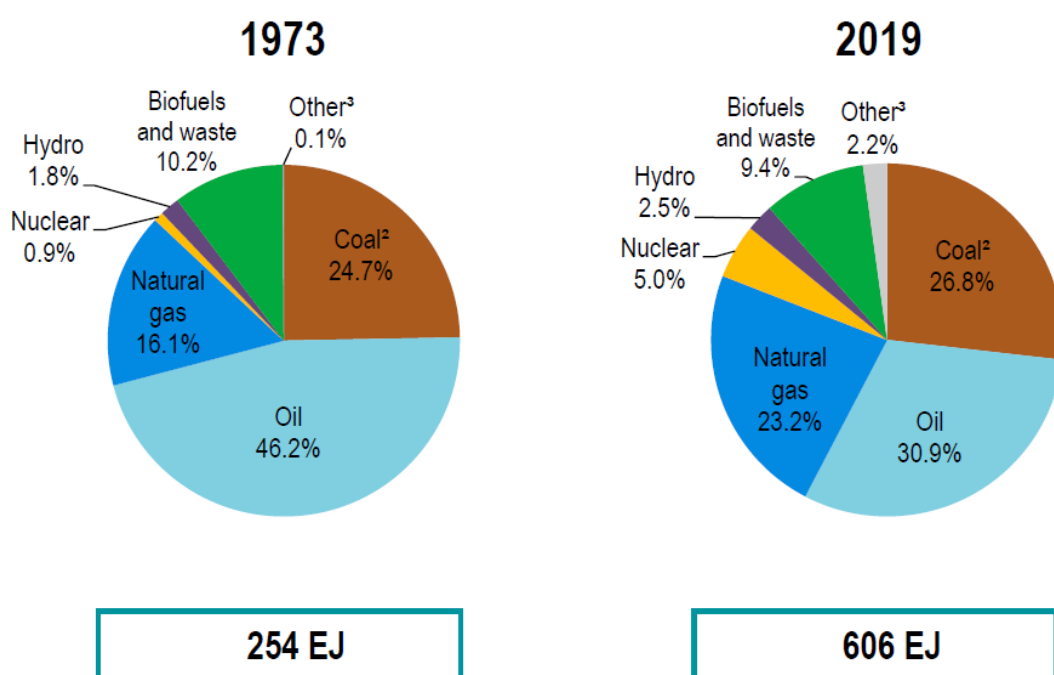


Figura 2.12 - Oferta Global de Energia Primária, 1973 e 2019 (Exajoules)

Fonte: IEA – Key World Energy Statistics 2021

¹⁸ Organização dos Países Exportadores de Petróleo – organização sediada em Viena, um cartel do petróleo fundada originalmente por Irã, Iraque, Arábia Saudita, Kuwait e Venezuela.

¹⁹ Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico – organização internacional que reúne as economias avançadas do Ocidente e, mais recentemente, países emergentes.

O que está começando a ficar claro para a sociedade é que a descarbonização é um problema de infraestrutura, o maior já enfrentado pela humanidade. Envolve não só a produção de energia, mas também o transporte, iluminação, aquecimento, refrigeração, cozimento e outros sistemas e serviços básicos. A infraestrutura de combustível fóssil mundial inclui não apenas poços de petróleo e gás, minas de carvão, superpetroleiros, oleodutos e refinarias, mas também milhões de automóveis, postos de gasolina, caminhões-tanque, armazéns, usinas elétricas, trens a carvão, sistemas de aquecimento, fogões e fornos, no valor da ordem de trilhões de US\$.

A história mostra como o carvão, petróleo e gás natural demoraram décadas até conseguirem ter destaque na matriz energética mundial. O carvão só desbancou a lenha como principal energético mundial por volta de 1900. O petróleo só superou o carvão em 1960 e até hoje é a principal fonte energética do planeta. Muitos entendem não haver motivos para crer que a ascensão das energias renováveis será diferente, mas fica a cada dia mais claro que a trajetória da China é determinante para o sucesso de uma transição energética

2.4 – Conversores energéticos e eficiência energética

Um conversor de energia é um dispositivo ou sistema que transforma uma forma de energia em outra. A conversão de energia é o processo de tornar a energia mais utilizável. Seguem alguns exemplos de conversores de energia:

- Conversores de energia: convertem energia elétrica de uma forma para outra, como corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC). Eles também podem alterar a voltagem ou frequência da corrente.
- Transformadores: convertem a voltagem alternada de um valor para outro.
- Células solares: convertem a energia da luz solar em eletricidade.
- Turbinas eólicas: convertem a energia cinética do vento em energia mecânica ou elétrica.
- Mitocôndrias: convertem energia química dos alimentos em energia que a célula pode usar.

Foi visto na seção 2.1 que as fontes energéticas primárias tipicamente são convertidas em outros vetores energéticos nos centros de transformação, para atender as demandas da sociedade, conforme a figura 2.13:

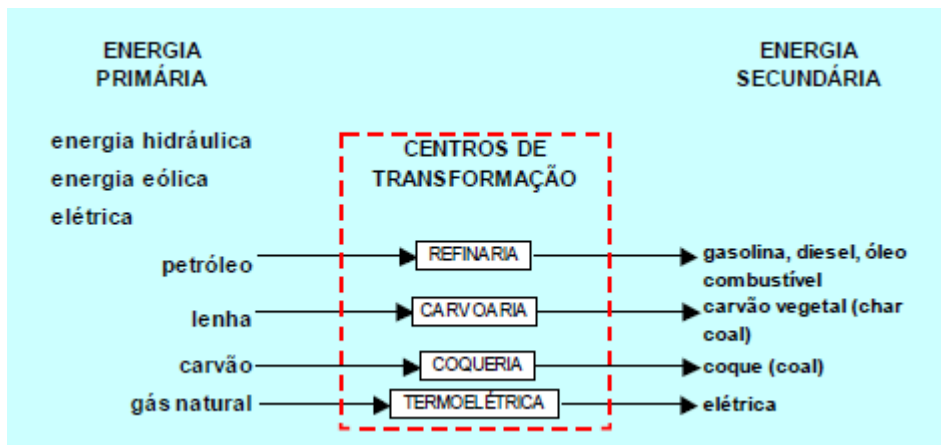


Figura 2.13 – Centros de Transformação Energética

A tabela 2.3. elenca uma série de dispositivos conversores de energia, suas formas de conversão energética e eficiência típica no processo de conversão:

Tabela 2.3 – Conversores energéticos, formas de conversão e eficiência típica

Energy Conversion Device	Energy Conversion	Efficiency (%)
Electric heater	Electricity/Thermal	100
Electric generator	Mechanical/Electrical	95
Electric motor (large)	Electricity/Mechanical	90
Battery (dry cell)	Chemical/Electrical	90
Steam boiler (power plant)	Chemical/Thermal	85
Home gas furnace	Chemical/Thermal	85
Home oil furnace	Chemical/Thermal	65
Electric motor (small)	Electrical/Mechanical	65
Natural gas combined cycle	Chemical/Mechanical	60
Home coal furnace	Chemical/Thermal	55
Steam turbine	Thermal/Mechanical	45
Diesel engine ⁸⁰	Chemical/Mechanical	43
Gas turbine (aircraft)	Chemical/Mechanical	35
Gas turbine (industrial)	Chemical/Mechanical	30
Automobile engine	Chemical/Mechanical	25
Fluorescent lamp	Electrical/Light	20
Human ⁸¹	Chemical/Mechanical	18
Silicon solar cell	Solar/Electrical	15
Steam locomotive	Chemical/Mechanical	10
Horse ⁸²	Chemical/Mechanical	10
Incandescent light (light bulb)	Electrical/Light	5

Source: Pennsylvania State University's Earth and Mineral Sciences web site: www.ems.psu.edu/~radovic/fundamentals4.html, unless otherwise noted.

É possível verificar que a conversão de eletricidade em calor (aquecedor, chuveiro) tem 100% de eficiência, pois existe um processo de conversão de uma forma energética de alta qualidade (eletricidade) em uma de baixa qualidade (calor). Por outro lado, lâmpadas incandescentes são dos conversores menos eficientes que existem, por isso sua venda já foi proibida em quase todo o mundo.

Como é amplamente sabido, o uso eficiente de energia, às vezes chamado simplesmente de eficiência energética, é o objetivo de reduzir a quantidade de energia necessária para fornecer produtos e serviços. Entre todas as medidas propostas por especialistas para combater a

trajetória insustentável de emissões de GEE, esta é aquela no qual se depositam as maiores esperanças. Entre as ações sugeridas pela agência para atingir uma trajetória virtuosa (“cenário ponte”) de emissões, o uso eficiente de energia representa quase 50% do esforço, que ainda contempla o uso de energias renováveis, a redução do uso ineficiente do carvão, captura de metano em processos upstream de petróleo e GN e a redução de subsídios para a cadeia de combustíveis fósseis.

Um setor relevante em que houve grande progresso recente, em termos de aumento de eficiência (menor energia final para um determinado serviço), é no de iluminação, com o advento de tecnologia LED (*light emitting diode* – diodo emissor de luz) e variantes, como o OLED (LED orgânico). Além de grande durabilidade, as lâmpadas são muito mais versáteis (controle de cores etc.), se mostrando imbatível frente às demais tecnologias de iluminação.

Melhorias de eficiência são muitas vezes apontados como meios eficazes de redução no consumo de recursos. Para muitos, a ideia de que a redução do consumo de recursos e, portanto, a redução dos impactos ambientais associados, pode ser alcançado através de soluções baseadas em tecnologia é especialmente atraente.

Incentivos para efetuar melhorias de eficiência certamente têm vantagens econômicas e sociais, mas a noção de que tais melhorias levam a reduções no consumo de recursos é menos certo. Afinal de contas, os engenheiros têm realizado com sucesso melhorias da eficiência de conversores energéticos e processos industriais ao longo do século XX, conforme se vê nas figuras 2.14 e 2.15, respectivamente:

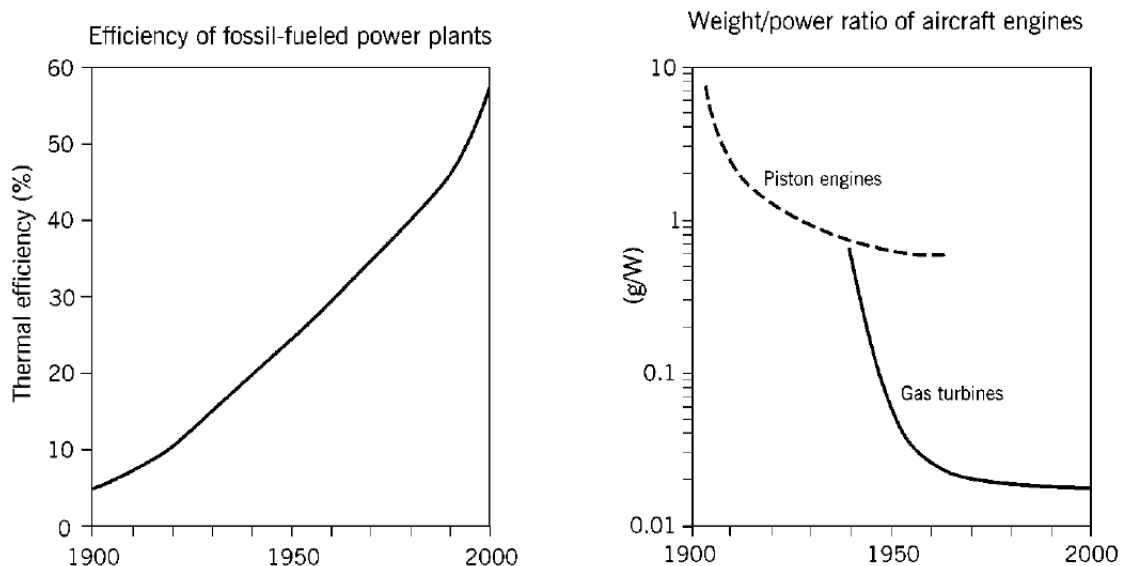


Figura 2.14 - Evolução Histórica da Eficiência de Conversores Energéticos

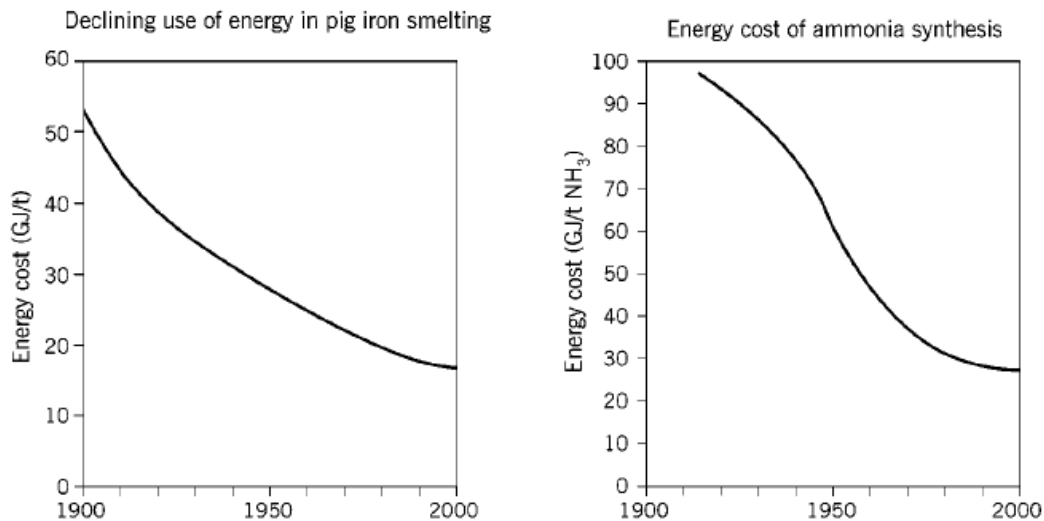


Figura 2.15 – Evolução Histórica da Eficiência em Processos Industriais

Fonte: Smil, V. – Energy in the 20th century: resources, conversions, costs, uses and consequences (2000)

No entanto, estas melhorias de eficiência de produto e processo geralmente não resultaram em reduções absolutas no consumo de recursos. Em vez disso, talvez não surpreendentemente, o consumo de recursos continuou a aumentar, impulsionada pelo crescimento da população e do aumento da afluência, entre outros fatores

Claramente, a fim de melhorar a eficiência para reduzir o consumo de recursos, essas inovações tecnológicas devem superar a aumentos na quantidade de bens e serviços prestados. No entanto, este requisito torna-se mais difícil pelo fato de que a eficiência e a quantidade não são totalmente independentes, e pode na verdade conduzir uma outra.

Talvez o exemplo mais conhecido dessa interdependência é o efeito rebote (“rebound effect”), conforme descrito pelo economista W. Stanley Jevons no século XIX, em que a melhoria da eficiência, na verdade, leva ao aumento do consumo de um recurso (Jevons 1865). A existência de tais relações poderia significar que as melhorias de eficiência do produto e de processo pode, de fato, desempenhar um papel no aumento, e não na redução do consumo de recursos no nível do sistema.

Outro ponto relevante que dificulta a redução no consumo mundial de energia são os subsídios. Preços subsidiados de energia diminuem o incentivo para que consumidores e as sociedades utilizem energia de forma eficiente, resultando em maior consumo de energia e, por consequência, em maiores emissões do que ocorreriam caso os consumidores pagassem o custo verdadeiro da energia. Como estes subsídios são aplicados principalmente em países menos desenvolvidos, existe muita dificuldade política em remove-los subitamente.

O desperdício de recursos percebidos como de baixo custo (muitas vezes subsidiados) leva a ineficiências nas economias, como pode ser observado na figura 2.16, que mostra que países da OCDE nos quais a energia elétrica é mais cara (Dinamarca, Japão) são mais eficientes no uso de eletricidade na produção de riquezas (\$/kWh). Por outro lado, a Eslováquia e a República Checa, onde a tarifa elétrica média é muito mais baixa, são bem menos eficientes na geração de riquezas, ou seja, apresentam maior intensidade elétrica.

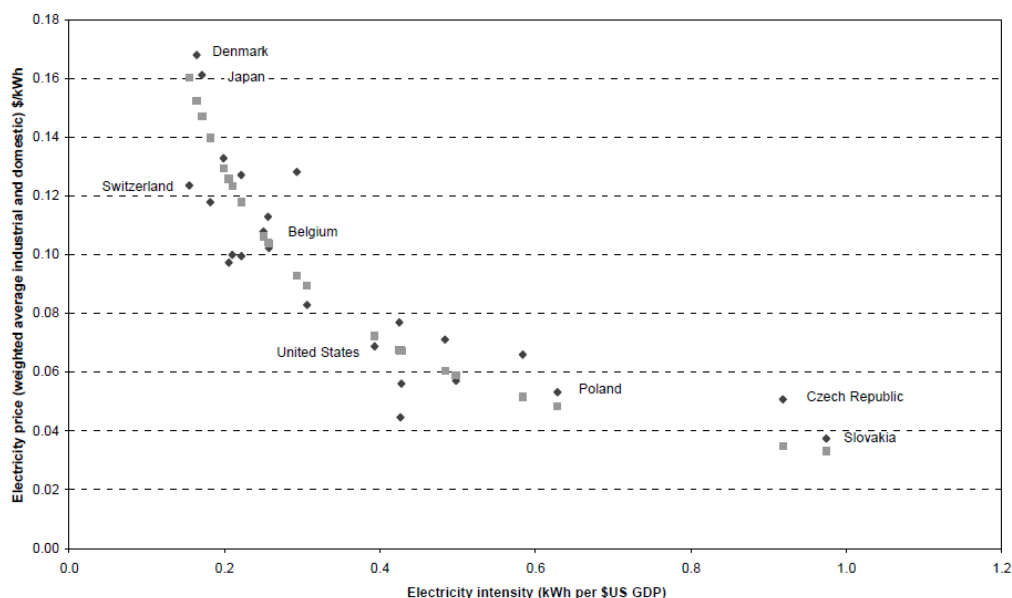


Figura 2.16 - Relação entre preço de eletricidade e intensidade elétrica em países membros da OCDE

Fonte: Verbruggen, V. Stalemate in energy markets: supply extension vs. demand reduction (2003)

Apesar dos benefícios que medidas de eficiência energética podem trazer a seu usuário e à sociedade como um todo, muitas barreiras impedem a sua disseminação. Por exemplo, companhias de energia são legalmente definidas como responsáveis pela oferta de energia e se espera que façam investimentos somente no setor de produção de energia, limitando o exame de alternativas de investimentos em outros recursos energéticos e em programas de conservação. A maioria dos consumidores não faz investimentos em eficiência energética porque não possui capital, ainda que as mesmas sejam vantajosas economicamente (p. ex., substituição de lâmpadas incandescentes por CFL ou LED). Às vezes, quem paga a conta de energia talvez não seja responsável pela seleção e compra dos equipamentos (p. ex., imóvel alugado). Além disso, diferentes consumidores têm maneiras distintas de estimar os retornos econômicos sobre seus investimentos em eficiência energética. Essas barreiras necessitam de políticas adequadas para serem quebradas. A Agência Internacional de Energia classifica os mecanismos para promoção da eficiência energética conforme abaixo:

- Mecanismos de suporte: apoio para mudanças de comportamento (p. ex., formação de técnicos), elaboração e disponibilização de diagnósticos energéticos, ferramentas de análise, portais na internet e publicações técnicas. Esse suporte é tanto para os usuários finais (consumidores), como para as empresas, indústrias etc.;
- Mecanismos de controle: direcionados à mudança de comportamento no mercado de energia, em geral, de caráter mandatário, através da aplicação de condicionantes para licenciamento e concessão, requerimentos legais, critérios de desempenho etc.;
- Mecanismos de mercado: utilizam as forças de mercado, em geral, via preço de produtos ou serviços energéticos e aumento da transparência ao consumidor final para influenciar as escolhas dos mesmos na direção do consumo racional de energia;
- Mecanismos de fundos: fornecem recursos para outros mecanismos, promovendo a comercialização e investimentos em eficiência energética, de forma vantajosa.

2.5 - Termoeletricidade

O principal conversor energético do planeta é o conjunto das usinas termelétricas que fornecem mais de metade da eletricidade consumida no planeta. A figura 3.4 mostra a resiliência das térmicas fósseis: no último quase meio século, sua participação na geração elétrica global passou de 75,2% para 60,3%. A liderança global do carvão se manteve; o gás natural duplicou sua participação, substituindo o óleo combustível de petróleo como segunda principal fonte de energia elétrica. As térmicas nucleares triplicaram sua participação no período e hoje contribuem com 10%. As fontes renováveis, liderados pela hidroeletricidade, somadas à solar, eólica, geotérmica e bioeletricidade respondem hoje por 26% do total, pouco mais do que em 1973.

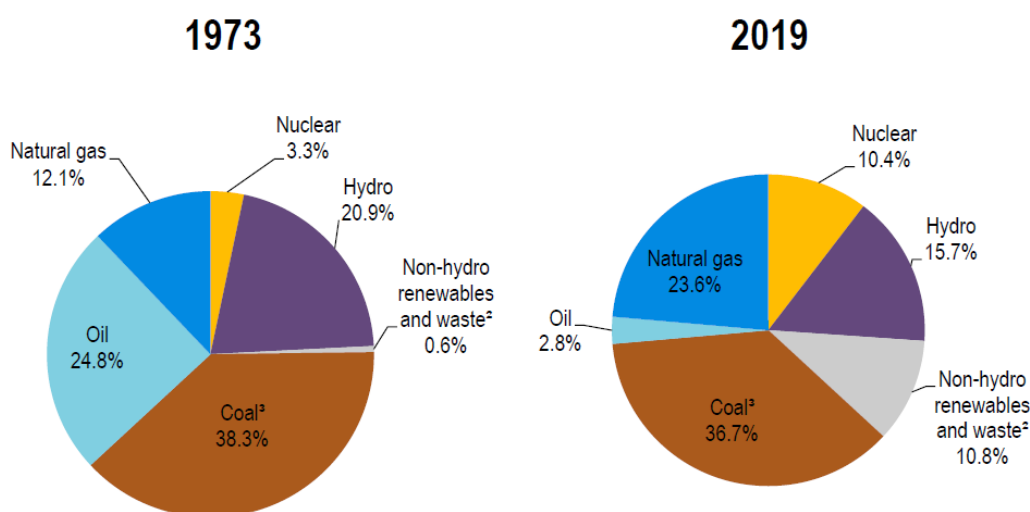


Figura 2.17 – Participação das fontes de energia elétrica no mundo

Fonte: IEA – Key World Energy Statistics 2021

Uma usina termoeletrica ou termelétrica¹ é uma instalação industrial usada para geração de energia elétrica a partir da energia liberada por qualquer produto que possa gerar calor, como bagaço de diversos tipos de plantas, restos de madeira, óleo combustível, óleo diesel, gás natural, urânio enriquecido e carvão mineral. O processo de geração de calor provem de duas rotas tecnológicas:

- Combustão: envolve reações entre átomos de carbono e hidrogênio de um combustível fóssil ou biomassa com oxigênio atmosférico, resultando na formação de dióxido de carbono (CO₂) e vapor d'água (H₂O) e liberando energia térmica
- Fissão: a quebra de núcleos atômicos pesados (em particular, o urânio) forma outros elementos (radioativos) e libera intensa energia

A eficiência de uma máquina térmica (a fração de energia do calor de entrada que pode ser convertida em trabalho útil) está limitada pela diferença de temperatura entre o calor de entrada do processo (T_h , expresso em Kelvin) e o calor de escape da máquina (T_c , também expresso em Kelvin), um limite imposto pelo Teorema de Carnot, que impõe um limite à eficiência de uma máquina térmica ideal, na qual não existe o efeito de atrito entre peças constituintes nem emissão de energia na forma de som, entre outros. A prova do teorema leva à conclusão que não existe uma máquina térmica com rendimento superior ao de uma máquina de Carnot e esse rendimento máximo é dado por: eficiência máxima = $1 - T_c/T_h$

As principais tecnologias de conversão químico-elétrica são:

- Turbina a vapor (ciclo Rankine) – trabalha com combustíveis sólidos (carvão, biomassa), líquidos (óleos) e gasosos;
- Turbina a gás (ciclo Brayton) – trabalha com gases, majoritariamente GN;
- Motogerador a combustão interna (ciclo Diesel ou Otto) – trabalha com combustíveis líquidos e gasosos

As usinas termelétricas (UTES) a vapor (ciclo Rankine) são os conversores elétricos que predominam no mundo, respondendo por mais da metade da geração mundial. Os principais equipamentos que as compõem são: caldeira, turbina, gerador e transformador.

É na caldeira que se processa a queima do combustível, liberando energia térmica. No interior da mesma circulam tubulações contendo água, que se aquece com a absorção do calor disponibilizado na combustão. Quando aquecida, a água passa do estado líquido para o estado gasoso (vapor). Sendo a caldeira um modulo fechado, a energia no vapor se eleva, elevando a temperatura e a pressão. Dessa forma, o vapor superaquecido é dirigido à turbina que converterá a energia térmica em energia mecânica (rotacional), ou seja, a energia contida no vapor aciona o eixo da turbina fazendo o mesmo girar. Uma vez que o eixo da turbina está solidamente conectado ao eixo do gerador elétrico, este também é acionado, produzindo então energia elétrica. Esta energia é enviada a um transformador que ajusta as características de

energia gerada aos padrões da rede de transmissão, que é enviada através de uma linha até os consumidores. Das perdas totais de um sistema termelétrico convencional a vapor, 10% ocorrem na caldeira e aproximadamente 55% se devem ao calor contido no vapor exausto nas turbinas a vapor. De fato, tipicamente, $T_h \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$ (723 K), em função dos limites impostos pelos materiais adotados, ao passo que T_c tipicamente = $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (363 K), na saída do condensador. Logo, a eficiência máxima teórica deste tipo de conversor não consegue exceder 50%.

A Figura 2.18 mostra um desenho esquemático de uma usina termoelétrica a vapor.

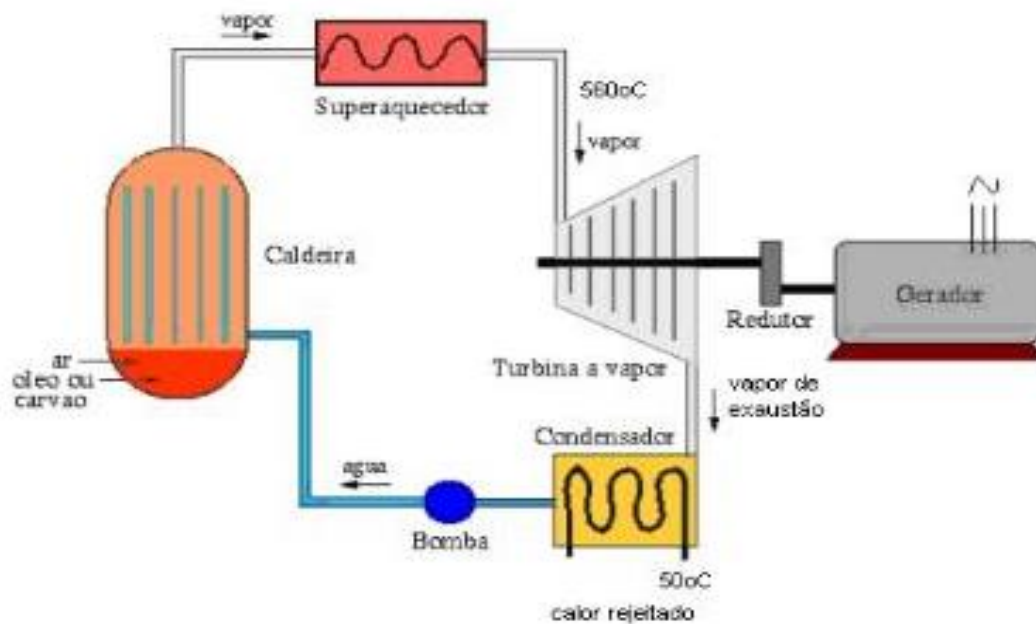


Figura 2.18 – Esquemático de uma UTE com turbina a vapor

Conforme visto na seção 2.3, por conta da combustão, as UTEs são as principais fontes concentradas de emissão de poluentes atmosféricos, com significativos efeitos em termos de saúde pública e impactos climáticos locais e regionais. UTEs também são a principal fonte antropogênica de emissão de CO_2 .

Dada a histórica inércia das cadeias energéticas, a IEA entende que, considerando que usinas termoelétricas tipicamente são projetadas para durar 50 anos, é muito provável que a humanidade irá conviver com combustíveis fósseis até, no mínimo, meados do século XXI.

2..6 – Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento mais abundante do Universo, compondo 90% de todas as moléculas. Por ser o primeiro elemento da Tabela Periódica, ele é o mais leve, daí ser encontrado em fase gasosa na alta atmosfera (termosfera), indisponível para uso humano. Entretanto, ele é encontrado na água, na biomassa e compostos orgânicos em geral, incluindo fósseis.

A indústria fóssil e de bioenergia lida com combustíveis que contém diferentes proporções de hidrogênio e carbono, conforme a tabela 2.4

Tabela 2.4 – Relação entre átomos de H vs. C em diversos combustíveis

	H/C	FONTE	Emissão de CO ₂ p/unidade energia
Madeira	1a3/10	Renovável	Aumenta
Carvão	1/2	Fóssil	
Petróleo	2/1	Fóssil	
Gás Natural	4/1	Fóssil	
Etanol	2/1	Renovável	
Metanol	2/1	Renovável	Reduz
Hidrogênio	Puro	Renov/Fóssil	Aprox. 0% emissão

Como a combustão de hidrogênio resulta somente na produção de vapor de água, mas não de CO₂, as empresas dos citados setores têm investido na produção de hidrogênio. Apesar de o vapor d'água ser um GEE, ele tem curta duração na atmosfera. E, como o sol irradia um fluxo energético 10.000 maior do que aquele produzido pela sociedade, para todos os efeitos práticos, o efeito estufa do vapor d'água é natural, não sendo considerado um GEE antropogênico.

Os combustíveis fósseis podem ser reformados para liberar o hidrogênio de suas moléculas de hidrocarbonetos e são a fonte da maior parte do hidrogênio atualmente produzido no mundo. A combinação desses processos com captura, utilização e armazenamento de carbono poderá, em tese, reduzir as emissões de dióxido de carbono.

As principais fontes de gás hidrogênio são combustíveis fósseis, sendo o gás natural o mais comum, respondendo por quase 47% da produção global em 2021. O carvão é a segunda fonte mais comum, respondendo por 27% da produção global. O hidrogênio é um subproduto da produção de petróleo, que respondeu por 22% da produção global no mesmo ano

Outras fontes de hidrogênio incluem:

- Eletrólise: um método que usa eletricidade para decompor água e produzir hidrogênio. Em 2021, apenas cerca de 4% da produção global de hidrogênio veio da eletrólise.
- Biomassa: o hidrogênio pode ser gerado a partir da biomassa, mas esse método enfrenta desafios tecnológicos e econômicos.
- Plasmólise de vapor de água: método que usa vapor de água e microplasmas para produzir hidrogênio. Este método é mais eficiente em termos de energia do que a eletrólise e tem um custo menor.

A figura 2.19 mostra as diferentes fontes de obtenção e uso do hidrogênio. Vê-se que ele não é uma fonte primária de energia: ele é um vetor energético, um armazenador de energia química, tal como uma bateria.

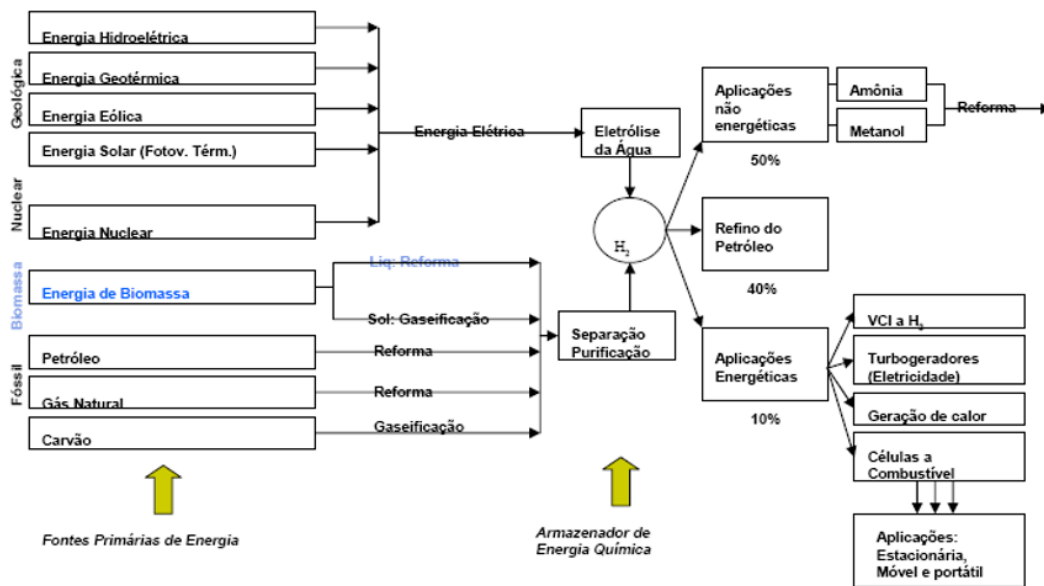


Figura 2.19 – Formas de obtenção e uso de hidrogênio.

Para distinguir a procedência de um fluxo de carbono, que determinará a sua pegada de carbono, criou-se um sistema de cores para designar diferentes fontes, conforme abaixo:

- **Hidrogênio verde** - é aquele produzido pela divisão da água por eletrólise, produzindo apenas hidrogênio e oxigênio. Este processo precisa ser alimentado por fontes de energia renováveis, como eólica ou solar. Isso torna o hidrogênio verde a opção mais limpa, oriundo de fontes de energia renováveis sem CO₂ como subproduto.
- **Hidrogênio azul** - é quando o gás natural é dividido em hidrogênio e CO₂ por Steam Methane Reforming (SMR) ou Auto Thermal Reforming (ATR), mas o CO₂ é capturado e então armazenado. À medida que os gases de efeito estufa são capturados, isso atenua os impactos ambientais no planeta. A "captura" é feita por meio de um processo chamado Carbon Capture Usage and Storage (CCUS).
- **Hidrogênio cinza**: ele é produzido há muitos anos. É um processo semelhante ao do hidrogênio azul (SMR ou ATR), mas o CO₂ não é capturado, sendo liberado na atmosfera.

O hidrogênio é usado no refino de petróleo, produção de amônia, produção de metanol e na fabricação de ferro reduzido direto.

Na prática, o hidrogênio é um gás muito leve, que não pode utilizar, por questões físicas e químicas, a malha de distribuição de gás natural. Da mesma forma, seu ponto de fusão é muito mais baixo do que a do gás natural, de forma que os navios chamados “metaneiros”, que carregam gás natural líquido (GNL) pelos oceanos, não podem ser utilizados para transportar

hidrogênio Desta forma, os grandes parques solares e eólicos que desenvolvem projetos de produzir hidrogênio verde, normalmente associam a produção deste vetor em conjunto com uma fábrica de amônia ou metanol, anexa. Ambos os produtos são muito utilizados na indústria, sendo a amônia um precursor de fertilizantes nitrogenados. Como o Brasil é importador destes dois produtos à base de hidrogênio, projetos com esta configuração fazem sentido econômico.

2.7 - Fontes Energéticas Não Renováveis

Segundo a teoria biogênica, a mais aceita, a origem dos combustíveis fósseis está no processo natural de decomposição anaeróbica de matéria orgânica (animais e plantas), que teriam sido soterrados e submetidos à ação de pressão e temperaturas muito elevadas. A idade dos organismos e seus combustíveis fósseis resultantes é tipicamente milhões de anos, às vezes ultrapassando 450 milhões de anos. Ou seja, os combustíveis fósseis não são renováveis ao longo da escala de tempo humana, ainda que, ao longo de uma escala de tempo geológica, esses combustíveis continuem a ser formados pela natureza.

Os combustíveis fósseis se caracterizam por conter percentagens elevadas de carbono e incluem carvão, petróleo e gás natural. Eles variam de materiais voláteis, com baixa emissão de carbono (caso do metano, que contém razão 4:1 de átomos de H para C), até materiais não voláteis compostos de carbono quase puro, como o carvão antracito. Os combustíveis fósseis são de grande importância porque eles podem ser queimados (oxidado em CO₂ e H₂O), produzindo quantidades significativas de energia por unidade de peso. O uso do carvão como combustível antecede a história gravada. O carvão foi usado para executar fornos para a fusão de minério de metal. Hidrocarbonetos semissólidos de infiltrações também foram queimados em tempos antigos, mas estes materiais foram utilizados principalmente para a impermeabilização e embalsamamento.

Petróleo e gás natural são formados pela decomposição anaeróbica de restos de organismos, incluindo fitoplâncton e zooplâncton que se instalaram no fundo do mar (ou lago) em grandes quantidades, em condições anóxicas, milhões de anos atrás. Ao longo do tempo geológico, essa matéria orgânica, misturada com lama, é soterrada sob pesadas camadas de sedimentos. Os níveis elevados resultantes do calor e da pressão causam a matéria orgânica a se alterar quimicamente, em primeiro lugar um material ceroso conhecido como querogênio (encontrado em xistos oleosos), e, em seguida, com mais calor, em hidrocarbonetos líquidos e gasosos num processo conhecido como catagênese.

Há uma grande variedade de compostos orgânicos, ou hidrocarbonetos, em qualquer mistura de combustível fornecido. A mistura específica de um combustível de hidrocarbonetos dá suas propriedades características, tais como ponto de ebulição, o ponto de fusão, densidade, viscosidade, etc.

Plantas terrestres, por outro lado, tendem a formar carvão e metano. Muitos dos campos de carvão datam do período Carbonífero da história da Terra. Plantas terrestres também formam querogênio (tipo III), uma fonte de gás natural.

Reservas e recursos minerais são definidos como volumes que serão comercialmente recuperados no futuro. Ao contrário do inventário de uma empresa de fabricação, as reservas são fisicamente localizadas em reservatórios no subsolo e não pode ser inspecionada visualmente e contadas, mas são estimativas baseadas na avaliação dos dados que fornece provas da quantia de presente daquele recurso mineral. Não há nenhuma resposta definitiva até ao final da vida produtiva de um reservatório. Todas as estimativas de reservas envolvem algum grau de incerteza. A estimativa de volumes de reservas é geralmente realizada por indivíduos altamente qualificados que usam a sua experiência e julgamento profissional no cálculo desses volumes.

A dotação mineral total de uma área é dividida em duas partes principais: os recursos identificados e recursos não descobertos. Estes, por sua vez, são subdivididos em função da adequação dos conhecimentos sobre os depósitos e os fatores econômicos vigentes. As definições de termos de reservas e recursos que seguem são as adotadas por agências de petróleo do Brasil e dos EUA:

- **Recurso:** a concentração de sólidos, líquidos ou gasosos de materiais de ocorrência natural dentro ou sobre a crosta da Terra, de tal forma que sua extração econômica é considerada viável, seja atualmente ou em algum tempo futuro.
- **Recurso identificado:** Um recurso cuja localização, grau, qualidade e quantidade são conhecidas ou podem ser estimados a partir de evidências geológicas específicas. Incluem recursos econômicos, marginalmente econômicos e subeconômicos.
- **Recurso não descoberto.** Recurso não descoberto, mas cuja existência é inferida, a partir de amplo conhecimento e teoria.
- **Reserva.** A parte de um recurso identificado passível de ter destinação econômica e legalmente extraída no momento da determinação.

2.5.1 - Petróleo

O petróleo (óleo cru), é uma substância oleosa, inflamável, geralmente menos densa que a água, com cheiro característico e coloração que pode variar desde o incolor ou castanho claro até o preto, passando por verde e marrom (castanho).

O petróleo possui uma combinação complexa de hidrocarbonetos (HC), que representam, em geral, mais de 95% da massa. Também pode conter quantidades pequenas de nitrogênio (N), oxigênio (O), compostos de enxofre (S) e íons metálicos. Esta categoria inclui petróleos leves, médios e pesados, assim como os óleos extraídos de areias betuminosas. Materiais hidrocarbonatados, que requerem grandes alterações químicas para a sua recuperação ou

conversão em matérias-primas para o refino do petróleo, tais como óleos de xisto e combustíveis líquidos de hulha (carvão) não se incluem nesta definição.

O petróleo serve como base para fabricação dos mais variados produtos, dentre os quais se destacam: benzinhas, óleo diesel, gasolina, GLP, gás natural, querosene, óleos lubrificantes, asfalto, polímeros plásticos, fertilizantes, pesticidas e até mesmo medicamentos.

Conforme já visto, petróleo é criado via restos orgânicos de animais e vegetais depositados no fundo de lagos e mares. As altas pressões e temperaturas levam a transformações químicas da biomassa ao longo de milhares de anos. Querogênio é a parte insolúvel da matéria orgânica modificada por ações geológicas. Ele é formado a partir dos lipídios, proteínas e carboidratos dos seres vivos e se transforma em petróleo ou gás natural.

Com o aumento da temperatura ($\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$), as moléculas do querogênio começariam a ser quebradas, gerando compostos orgânicos líquidos e gasosos, num processo denominado catagênese. Para se ter uma acumulação de petróleo é necessário que, após o processo de geração (cozinha de geração) e expulsão, ocorra uma migração do óleo e/ou gás através das camadas de rochas adjacentes e porosas, até encontrar uma rocha selante e uma estrutura geológica que detenha seu caminho, sobre a qual ocorrerá a acumulação do óleo e/ou gás em uma rocha porosa chamada rocha reservatório.

Os hidrocarbonetos podem ocorrer no petróleo desde o metano (CH_4) até compostos com mais de 60 átomos de carbono. Estes podem estar conectados através de ligações simples, duplas ou triplas, e os arranjos moleculares são os mais diversos, abrangendo estruturas lineares, ramificadas ou cíclicas, saturadas ou insaturadas, alifáticas ou aromáticas. Os alcanos têm fórmula química geral $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ e são conhecidos na indústria de petróleo como parafinas. São os principais constituintes do petróleo leve, encontrando-se nas frações de menor densidade. As olefinas são hidrocarbonetos cujas ligações entre carbonos são realizadas através de ligações duplas em cadeias abertas, podendo ser normais ou ramificadas (Fórmula química geral C_nH_{2n}). Devido a sua alta reatividade não são encontradas no petróleo bruto. Sua origem vem de processos físico-químicos realizados durante o refino, como o craqueamento. Possuem características e propriedades diferentes dos hidrocarbonetos saturados. Os hidrocarbonetos acetilênicos são compostos que possuem ligação tripla (fórmula química geral $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$) e são ainda mais reativos.

Os ciclanos, de fórmula geral C_nH_{2n} contêm um ou mais anéis saturados e são conhecidos na indústria de petróleo como compostos naftênicos, por se concentrarem na fração de petróleo denominada nafta. São classificados como cicloparafinas, de cadeia do tipo fechada e saturada, podendo também conter ramificações. As estruturas naftênicas que predominam no petróleo são os derivados do ciclopentano e do ciclohexano. Em vários tipos de petróleo, podem-se encontrar compostos naftênicos com 1, 2 ou 3 ramificações parafínicas como constituintes principais. Em certos casos, podem-se ainda encontrar compostos naftênicos formados por dois

ou mais anéis conjugados ou isolados. A figura 2.20 ilustra algumas das citadas cadeias de hidrocarbonetos:

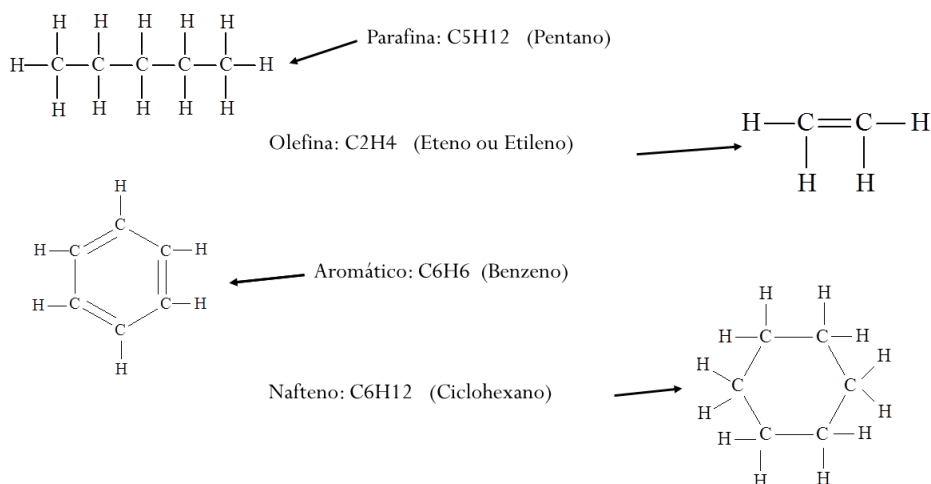


Figura 2.20 – Cadeias principais de Hidrocarbonetos

A destilação atmosférica é normalmente a etapa inicial de transformação realizada em uma refinaria de petróleo, após dessalinização e pré-aquecimento. A tabela 2.5 oferece uma relação das frações, a faixa de temperatura no qual são separados, a composição e os usos. Vê-se que, quanto maior o número de átomos de carbono na cadeia, maior será a temperatura de ebulição.

Tabela 2.5 – Principais frações do petróleo, composição e usos

Fração	Temp. Ebulição (°C)	Composição ≈	Usos
Gás residual	<40	C1-C2	Gás combustível
GLP		C3-C4	Gás combustível, uso doméstico e industrial
Gasolina	40-175	C5-C10	Combustível, solvente
Querosene	175-235	C11-C12	Iluminação, combustível
Gasóleo Leve	235-305	C13-C17	Diesel, fornos
Gasóleo Pesado	305-400	C18-C25	Combustível, lubrificantes
Lubrificantes	400-510	C26-C38	Óleos lubrificantes
Resíduos	>510	C38+	Asfalto, piche, impermeabilizantes

Conforme mencionado no capítulo 1, o petróleo tem sido cada vez menos usado na geração elétrica, ao passo que seu uso se torna crescente no setor de transportes. Isto implica na valorização dos óleos leves, que contém percentuais mais elevados de frações que formam a gasolina, querosene de aviação e diesel. Por outro lado, óleos mais pesados tendem a ter maior rendimento na produção de óleo combustível, derivado com demanda (em escala global) em

queda. Não à toa, os preços da gasolina e gasóleos leves são mais valorizados do que o do óleo combustível.:

Em função do valor diferenciado dos derivados leves, o indicador principal da qualidade do óleo, o fator que melhor reflete o valor relativo das diversas correntes petrolíferas (não existem dois petróleos com perfis iguais) é o grau de densidade específica (usando a água como referência), formulado pelo American Petroleum Institute, o chamado grau API, via a fórmula abaixo:

$$API = \frac{141,5}{dr(60 / 60)} - 131,5$$

Baseado no grau API, existe uma classificação dos petróleos, conforme segue:

- Petróleos Leves: densidade inferior a 870 kg/m³ ou API superior a 31,1
- Petróleos Médios: densidade entre 920 – 870 kg/m³ ou API entre 22,3–31,1
- Petróleos Pesados: densidade entre 1000 – 920 kg/m³ ou API entre 10,0- 22,3
- Petróleos Extrapesados: densidade superior a 1000 kg/m³ ou API inferior a 10,0

Apesar das críticas crescentes quanto ao uso do petróleo, sua produção e consumo mundial não cessam de aumentar e a IEA prevê aumento no consumo desta fonte energética ao longo desta década. Ela prevê que quase todo o crescimento projetado deverá vir de frete terrestre e marítimo, aviação e petroquímicos, setores onde as alternativas são escassas. Isto manterá em ascensão a demanda por óleo diesel e querosene de aviação ao passo que reduz a previsão de crescimento na demanda por gasolina, por conta da ascensão dos veículos elétricos, tema a ser tratado no capítulo 6.

Hoje, os EUA é o principal produtor de petróleo do planeta, com cerca de 22 milhões de barris/dia, o mesmo que o a Arábia Saudita e Rússia, combinados. O “milagre” norte-americano, que reverteu uma trajetória declinante na produção de petróleo que remonta a década de 1970, atende pelo nome de óleo de folhelho, mais conhecido pelo seu nome inglês, tight oil ou shale oil. É um típico exemplo de recurso não convencional de petróleo (também existe o shale gas, gás natural de formações de folhelho), removido através de técnicas de hidrofraturamento (hydraulic fracturing, ou fracking, em inglês). Estas fissuras liberam óleo e gás preso em formações pouco porosas. Várias críticas surgiram em torno de sua exploração: i) consumo excessivo de água (para o processo de injeção sob pressão); ii) contaminação de lençóis freáticos com substâncias misturadas à água usada no fracking; disposição inadequada de águas residuais, que frequentemente contêm substâncias radioativas, não passíveis de remoção em estações de tratamento convencionais; rápido declínio de produção etc. Entretanto, o ponto principal é que a produção deste recurso fóssil não-convencional por parte dos norte-americanos tem se mostrado a cada dia mais competitivo, resistindo à movimentos recentes empreendidos pela OPEP e Rússia no sentido de manipular os preços de petróleo e alijar o produto dos EUA do mercado.

Apesar das expressivas reservas mundiais, o volume médio das descobertas de petróleo, ao longo dos últimos 50 anos, tem consistentemente declinado, indicando um possível início da exaustão dos recursos petrolíferos. De fato, quase todo o petróleo adicional ofertado no mundo na última década se deve ao shale oil dos EUA

O avanço tecnológico da indústria do petróleo e GN tem levado ao aproveitamento de diversas formas não convencionais destes combustíveis. Óleo convencional é uma categoria que inclui óleo cru, gás natural e seus condensados. Petróleo não convencional consiste em ampla variedade de fontes de líquidos, incluindo areias betuminosas, petróleo extrapesado, gas-to-liquids e outros líquidos. Em geral, petróleo convencional é mais fácil e barato de produzir do que o não convencional. No entanto, estas categorias não são rígidas; ao longo do tempo, recursos então considerados não convencionais podem migrar para a categoria convencional. O petróleo do Pré-sal, p. ex., até o final do século passado era considerado recurso não convencional. A evolução tecnológica e a elevação de preços observados nos últimos 15 anos tornaram o petróleo do Pré-sal um recurso convencional

Um indicador que evidencia o esforço energético na extração de petróleo é o EROI – sigla em inglês, que significa a razão entre a energia extraída de petróleo (ou outra fonte fóssil, como GN e carvão) pela energia injetada no aproveitamento. A figura 2.21 mostra como este indicador é mais favorável a recursos convencionais (carvão, petróleo e GN) do que a outros, não convencionais, como as areias betuminosas e “shale oil”, além de biocombustíveis, como etanol e biodiesel.

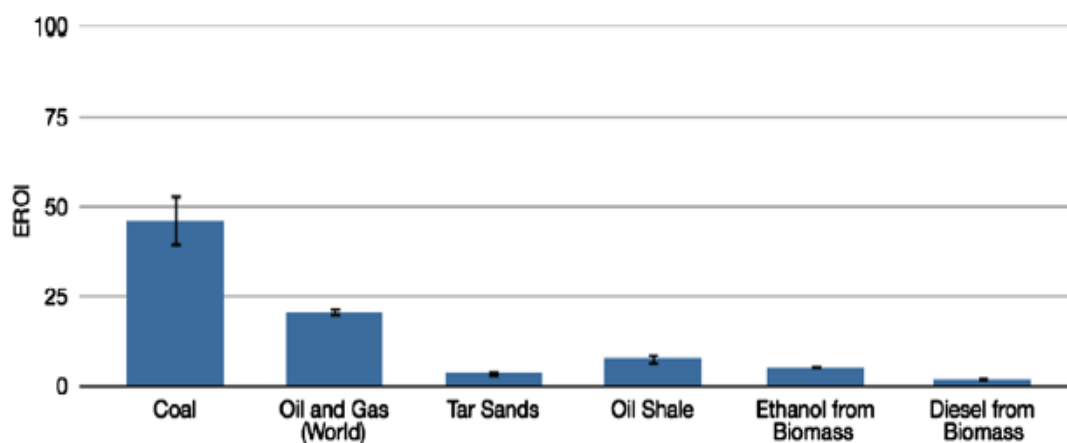


Figura 2.21 - EROI de Combustíveis Fósseis convencionais e não convencionais

Fonte: Hall et al. EROI of different fuels and the implications for society (2014)

Este indicador, no entanto, não pode ser encarado como uma panaceia, pois não existem metodologias consagradas para o seu cálculo, além do fato de que diferentes formas de energia são empregadas na cadeia de recursos fósseis e diferentes fontes energéticas possuem diferentes qualidades e considerações socioeconômicas. O ponto relevante é que os custos de

capital e de operação no aproveitamento de projetos de recursos não convencionais são maiores do que os convencionais.

Por fim, existem processos químicos que produzem derivados sintéticos de petróleo. É o exemplo da rota Fischer-Tropsch, que permite produzir, via gaseificação, combustíveis líquidos a partir de carvão (empregado pela África do Sul), GN ou mesmo, biomassa.

2.5.2 - Gás Natural

O gás natural (GN) transformou-se de sapo em príncipe na matriz energética mundial. No século XIX, nos Estados Unidos, era considerado um estorvo ao ser encontrado junto com o petróleo, pois exigia uma série de procedimentos de segurança que encareciam e complicavam as atividades de prospecção. No século XX, a partir dos anos 80, o consumo entrou em franca expansão e o GN transformou-se na fonte de energia de origem fóssil a registrar maior crescimento no mundo. Uma posição que detém até hoje e que deverá manter no médio prazo.

A versatilidade é a principal característica do gás natural. Este energético pode ser utilizado tanto na geração de energia elétrica, quanto em motores de combustão do setor de transportes, na produção de chamas (como substituto ao gás liquefeito de petróleo, GLP), calor e vapor. Por isso, a aplicação é possível em todos os setores da economia: indústria, comércio, serviços e residências.

Assim como ocorre no petróleo, o gás natural também é composto por hidrocarbonetos (átomos de hidrogênio e carbono) encontradas em estado volátil e de baixa densidade. A proporção de cada um na composição final depende de uma série de variáveis (fonte do gás e do processamento na UPGN), mas, tipicamente, o metano (CH₄) compõe 94,6% do total; o etano (C₂H₆) normalmente compõe 4,4%; o propano (C₃H₈) 0,2% e o Isobutano (C₄H₁₀) 0,01% do total. Contaminantes incluem vapor de água, dióxido de carbono, nitrogênio e sulfeto de hidrogênio

O gás natural é usado para muitas finalidades, incluindo:

- Aquecimento de casas, empresas e indústrias
- Geração de calor e eletricidade
- Indústria petroquímica
- Indústria de fertilizantes
- Produção de hidrogênio, enxofre e negro de fumo

Em seu estado bruto, o gás natural não tem cheiro e é mais leve que o ar. Assim, deve ser odorizado para que eventuais casos de vazamento sejam detectados.

Em suas primeiras etapas de decomposição, a matéria orgânica fóssil produz o petróleo. Em seus últimos estágios de degradação (craqueamento), o gás natural. Por isso, é comum a descoberta

do GN tanto associado ao petróleo quanto em campos isolados (GN não associado). Enquanto o GN não-associado pode ter a sua jazida não explorada, o GN associado tende a ser extraído, mesmo sem aplicação, tornando-se um subproduto da produção de petróleo.

Uma parte do GN associado é reinjetada no poço para forçar a saída de mais petróleo (recuperação secundária de petróleo), e o restante, se não for aproveitado, é queimado em tocha (flare). O GN não associado tem a vantagem de ter sua produção determinada pelo consumo, sem o inconveniente da queima do excedente não demandado.

Por outro lado, seu custo de produção é mais alto do que o do gás associado, pois todo o investimento está voltado para o gás, ao contrário do associado, no qual o investimento se destina principalmente à produção de petróleo.

A etapa básica do processamento do gás natural consiste em uma sequência de operações realizadas com o objetivo de separar suas frações mais pesadas, de maior valor econômico. O gás natural bruto também é submetido a um conjunto de operações de condicionamento ou tratamento, com o intuito de reduzir ou remover os contaminantes, segundo as especificações estabelecidas.

Durante o processamento o gás segue para unidades industriais conhecidas como UPGN (Unidades de Processamento de Gás Natural), onde ocorrerá sua desidratação e fracionamento, gerando as seguintes correntes:

- Metano e etano, que formam o gás processado ou residual;
- Propano e butano, que formam o GLP ou gás de cozinha;
- Um produto na faixa da gasolina (pentano e hidrocarbonetos superiores), denominado C5+ ou gasolina natural.

Na UPGN, vários são os produtos que podem ser obtidos em estado líquido. A alternativa mais simples consiste na produção do líquido do gás natural (LGN), formado por propano e hidrocarbonetos superiores.

A liquefação do gás natural a baixas temperaturas (-161 °C) aumenta sua densidade energética em 600 vezes. Ou seja, o volume ocupado por uma certa quantidade energética de gás na forma liquefeita é cerca de 1/600 do GN não comprimido. Esta é uma solução atrativa para longas distâncias (>4.000 km), principalmente por mar. O uso de GNL se aplica em percursos difíceis ou muito longos, projetos de grande porte, volumes de reserva de GN consideráveis e mercados cativos. Ao possibilitar o seu armazenamento próximo às áreas de consumo, o GNL permite o atendimento de picos de demanda de forma otimizada.

Projeções da IEA indicam que o gás natural deve se tornar a principal fonte energética nas próximas décadas, visão amplamente compartilhada pela indústria do petróleo e GN e por

muitas instituições governamentais e multilaterais, que advogam o GN como um combustível “ponte” num processo inexorável de descarbonização do setor energético mundial.

2.5.3 - Carvão Mineral

Existem dois tipos básicos de carvão na natureza: vegetal e mineral. Ambos podem ser usados na indústria (principalmente siderúrgica) e na produção de energia elétrica. No entanto, enquanto o primeiro é pouco utilizado – exceto no Brasil, maior produtor mundial –, o carvão mineral é a segunda fonte mais representativa da matriz energética mundial.

O carvão vegetal é obtido a partir da carbonização da lenha. Por outro lado, o carvão mineral é formado por troncos, raízes, galhos e folhas de árvores gigantes que cresceram há cerca de 250 milhões de anos (era paleozoica – período carbonífero) em pântanos rasos. Essas partes vegetais, após morrerem, depositaram-se no fundo lodoso e ficaram encobertas. O tempo e a pressão da terra que foram se acumulando sobre o material transformaram-no em uma massa negra homogênea: as jazidas de carvão mineral.

A formação do carvão mineral (doravante, carvão) é similar àquela do petróleo. Também é o resultado do decaimento incompleto de matéria orgânica vegetal, sujeita a soterramento através de sedimentação e subsequente alteração física e química induzida por temperaturas e pressões crescentes. Enquanto o petróleo e GN são produzidos a partir da acumulação de bactérias e de plantas aquáticas em sedimentos marinhos, o carvão é produzido a partir da acumulação de plantas terrestres no fundo de pântanos ou alagadiços de água doce.

Carvão não migra de sua fonte de origem; ele é achado no lugar da deposição original. Tipicamente, 1 metro de vegetação compactada resulta em 5cm de carvão (mineral). Processos resultantes do ambiente em altas pressões e temperaturas causam a retirada de água e gases orgânicos (voláteis), provocando aumento do teor de C fixo, em função da profundidade e tempo de soterramento.

O petróleo tem uma razão C:H de aproximadamente 1:2 em átomos, à semelhança do material de origem. Por outro lado, a razão C:H no carvão é bastante diferente do material que lhe deu origem. Carvão têm razões C:H mais altas do que o petróleo, e contém também S, N, O e impurezas. A figura 2.22 ilustra a complexa estrutura química típica do carvão.

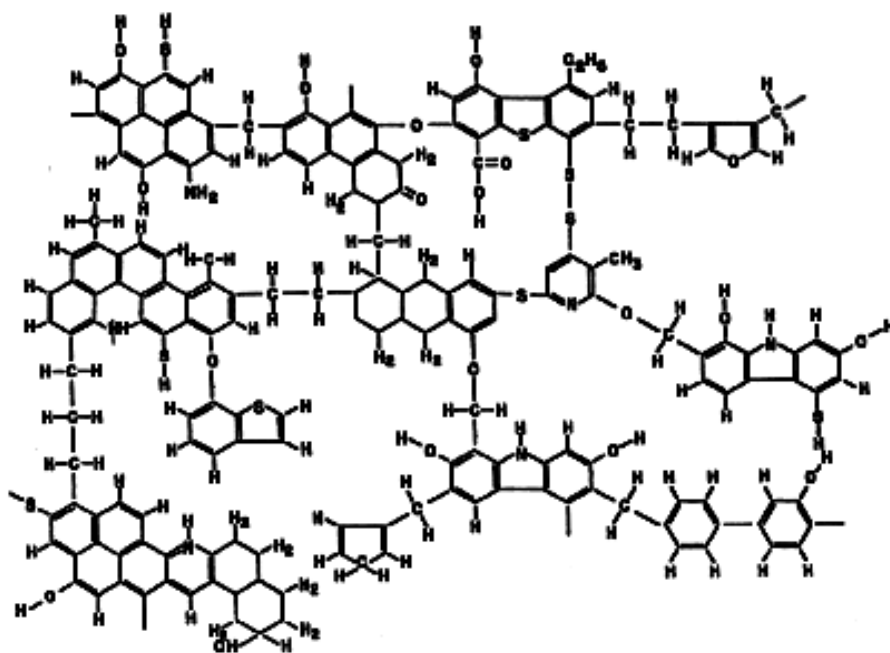


Figura 2.22 – Estrutura típica do carvão

Como qualquer combustível, o carvão é valorizado pela alta concentração de C, em detrimento de H, O, N e impurezas, que comprometem o PCI. Esse combustível fóssil é classificado, de acordo a sua qualidade, conforme abaixo:

- Turfa – possui baixo (~45%) conteúdo carbonífero e alto teor de água e impurezas; constitui um dos primeiros estágios do carvão
- Linhito - apresenta teor de carbono que varia de 60% a 75%;
- Carvão sub betuminoso²⁰;
- Carvão betuminoso - contém entre 69% e 85% de carbono; e
- Antracito - mais puro dos carvões, apresenta conteúdo carbonífero superior a 90%.

A idade geológica, o poder calorífico e teor de carbono fixo dos carvões diminuem tendencialmente, do antracito ao linhito, ao passo que os teores de material volátil e umidade aumentam. Isso torna o antracito e o carvão betuminoso mais nobres que o carvão sub-betuminoso e linhito. Carvões de classe inferior apresentam geralmente um teor maior de cinzas e contaminantes, mas isso não interfere diretamente na classificação do carvão. A umidade se encontra abaixo de 20 % em carvão betuminoso, entre 20 e 30 % em carvão sub-betuminoso, ao passo que o linhito apresenta um teor de umidade de até 45 % p/p. Seus usos estão expressos na figura 2.23:

²⁰ O antracito e o carvão betuminoso são classificados por seu teor de carbono fixo até uma percentagem de 69 %. Abaixo dessa percentagem, a classificação é feita pelo poder calorífico, independente do teor de C fixo

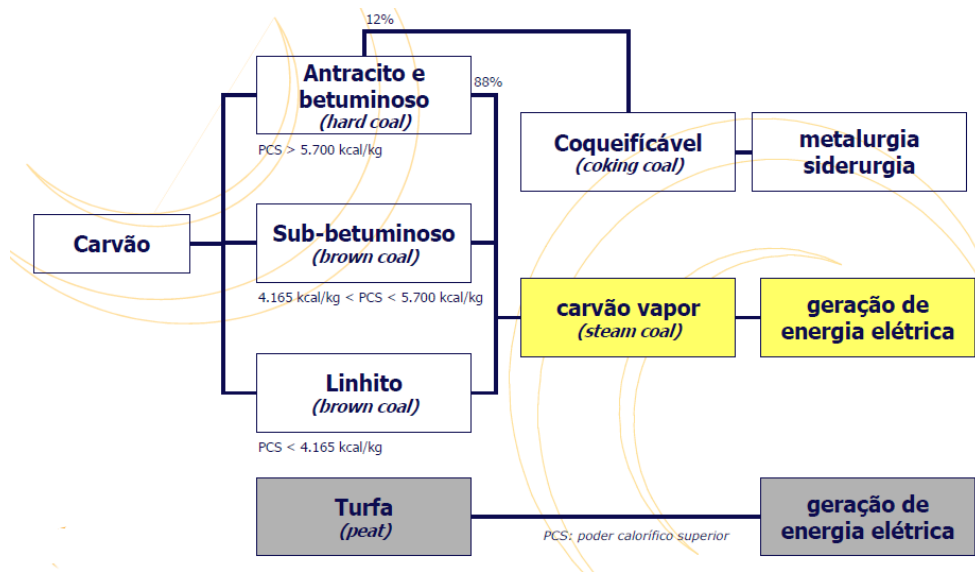


Figura 2.23 - Tipos de carvão e usos.

Fonte: EPE – PNE 2030 Carvão (2006)

Publicações especializadas indicam que a razão reserva / produção global de carvão é de mais de 150 anos, três vezes o valor estimado para o petróleo e gás natural. Além de mais abundante, o carvão também é o mais barato dos combustíveis fósseis, daí sua produção e consumo crescer expressivamente durante o século XXI, particularmente na região da Ásia-Pacífico, reflexo da duradoura importância deste combustível na matriz energética chinesa e indiana, que deve se tornar o novo motor da expansão deste combustível nas próximas décadas. No caso chinês, a crescente deterioração da qualidade do ar nas principais cidades tem levado o governo a reduzir o quanto possível o uso deste energético, que tem sido substituído em escala recorde por fontes renováveis (eólica, solar FV), além de energia nuclear.

2.5.4 - Energia Nuclear

Conforme exposto no início do capítulo, a combustão é uma reação química exotérmica (ou seja, envolve interações entre núcleos e elétrons, proporcionando a liberação de energia). Por outro lado, o núcleo de um átomo, constituído de prótons e nêutrons, é mantido agregado pela força nuclear forte. A energia libertada na maioria das reações nucleares é muito maior do que nas reações químicas, pois a energia de ligação de um núcleo é muito maior do que a energia que mantém elétrons ligados ao núcleo. Por exemplo, enquanto uma reação química libera da ordem de 10 elétron volt (eV) de energia, em uma fissão do núcleo do isótopo 235 do urânio são liberados 200 milhões de eV. Em função dessa disparidade, a fissão de 10 gramas de U-235 proporciona uma energia equivalente a mais de uma tonelada de carvão, sem apresentar poluição atmosférica ou emissão de GEEs (sempre fruto de processos químicos).

Existem duas formas de converter a energia nuclear em calor:

- Fissão nuclear - onde um núcleo atômico se subdivide em duas ou mais partículas;
- Fusão nuclear - na qual ao menos dois núcleos atômicos se unem para produzir um novo núcleo.

A fusão de dois núcleos com massas leves, menores do que o Fe-56 normalmente são exotérmicas, da mesma forma que a fissão de átomos mais pesados, caso do urânio e plutônio, também liberam energia.

O sol é o reator a fusão nuclear mais conhecido. A gravidade força com isótopos²¹ de hidrogênio (deutério, contendo um próton e um nêutron e trício, contendo um próton e dois neutrons) do núcleo solar se fundam, produzindo átomos de hélio e liberando enorme quantidade de energia. Entretanto, este é um processo envolvendo temperaturas da ordem de milhões de graus, daí não existir, até o momento, reatores a fusão em escala comercial (ou seja, que libera mais energia útil do que a demanda do aparato de fusão

Como os átomos de urânio são os maiores encontrados na natureza, a força atômica que mantém seu núcleo intacto é relativamente fraca, fazendo dele um candidato natural para a fissão. De fato, a fissão nuclear do urânio é a principal aplicação civil da energia nuclear, usada em centenas de usinas em todo o mundo. Nestas, nêutrons térmicos (baixa energia) colidem com átomos de U-235, um isótopo físsil do urânio, dividindo-os. Esta divisão resulta na geração de fragmento de fissão (dois átomos de menor número e peso atômico) e libera dois ou três nêutrons (figura 2.24). Estes nêutrons (rápidos) precisam ter sua energia diminuída, de forma a aumentar a probabilidade de, ao colidir com outros átomos de U-235 proporcionar outras fissões, causando uma reação em cadeia.

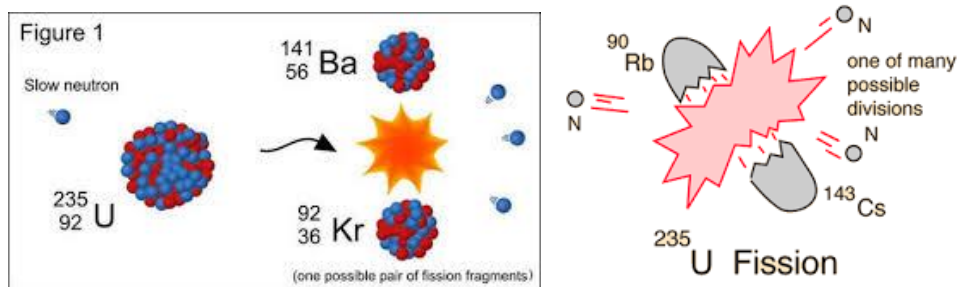


Figura 2.24 – Duas possíveis reações de fissão de urânio 235

Apesar da complexidade de uma usina nuclear, seu princípio de funcionamento é similar ao de uma termelétrica convencional, onde o calor gerado pela queima de um combustível produz vapor, que aciona uma turbina, acoplada a um gerador de corrente elétrica, conforme ilustrado na Figura 2.25).

²¹ Isótopos são átomos do mesmo elemento com números diferentes de nêutrons. Por conterem diferentes números de nêutrons, os isótopos têm diferentes massas atômicas.

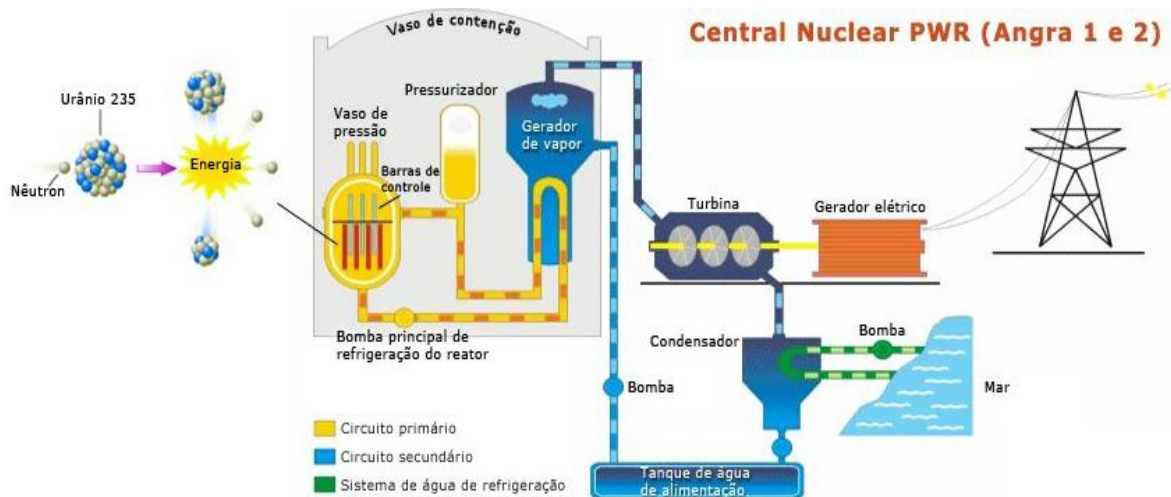


Figura 2.25 – Diagrama de usina nuclear tipo PWR

Na usina nuclear, o calor é produzido pela fissão do urânio no reator, cujo sistema mais empregado (PWR – *Pressurized Water Reactor*) é constituído de três circuitos, a saber: primário, secundário e de refrigeração. No primeiro, a água é aquecida a uma temperatura de aproximadamente 320 °C, sob uma pressão de 157 atmosferas (que impede a ebulição da água no circuito primário). Em seguida, essa água passa por tubulações e vai até o gerador de vapor, onde vaporiza a água do circuito secundário, sem que haja contato físico entre os dois circuitos. O vapor gerado aciona uma turbina, que movimenta o gerador e produz corrente elétrica.

O urânio extraído não chega à usina em estado puro: ele passa por um processo complexo de processamento que, em resumo, pode ser dividido em três etapas principais.

- A primeira delas é a mineração e beneficiamento, na qual o minério é extraído da natureza e enviado a uma unidade de beneficiamento, onde é purificado e concentrado, dando origem a uma espécie de sal de cor amarela, conhecido como yellow cake e cuja fórmula química é U_3O_8 .
- A segunda etapa é a conversão o U_3O_8 é dissolvido, purificado e convertido para o estado gasoso (gás UF_6).
- A terceira fase, de enriquecimento, caracteriza-se pelo aumento da concentração de átomos de U-235 (combustível das usinas nucleares), dos naturais 0,7% para algo como 4%. Para obter um quilo de produto são necessários cerca de oito quilos de yellow cake.

O processo completo de utilização do urânio, também chamado “ciclo do combustível nuclear”, abrange, ainda, a destinação do material utilizado, depois que o teor de U-235 fica abaixo de 3%. Normalmente, a disposição final do combustível utilizado é feita no interior da própria usina, em grandes piscinas com água, que age como refrigerante e moderador do material radioativo.

O setor nuclear já existe há mais de 80 anos e existem diversas tecnologias de geração de calor e energia elétrica via fissão do U-235. No entanto, eles têm em comum os seguintes elementos:

- Combustível nuclear: na maioria dos reatores, pastilhas de UO₂ são encapsuladas em tubos metálicos para formarem varetas de combustíveis. As varetas formam elementos combustíveis.
- Moderador: O material em núcleo de reator que reduz energia cinética dos nêutrons (nascentes) liberados da fissão para aumentar a probabilidade de fissão. Normalmente é água leve (H₂O), e também pode ser água pesada (D₂O) ou grafite.
- Barra de controle: são feitas com material absorvedor de nêutrons, como boro, cádmio, háfnio. São inseridas ou retiradas do núcleo para controlar a taxa de reação, e consequentemente a potência do reator, e também para desligamento normal e emergencial do reator.
- Refrigerante: O fluido que circula através do núcleo do reator para retirar o calor liberado. Em LWR (reator à água leve), a água leve funciona como moderador e refrigerante. Em reatores a gás, o refrigerante pode ser hélio ou CO₂, e o moderador é grafite.
- Vaso de pressão do reator: Normalmente um vaso de pressão de aço é usado para conter o núcleo de reator, moderador/refrigerante e as barras de controle.
- Gerador de Vapor: A maioria das centrais nucleares usam um circuito secundário de ciclo de vapor para geração de eletricidade, que recebe o calor transferido pelo refrigerante primário através do gerador de vapor. Em reatores BWR, o vapor é gerado diretamente no núcleo do reator e vai para a turbina a vapor.

A energia nuclear foi, durante alguns anos, a esperança da humanidade em uma energia praticamente inesgotável. No entanto, os acidentes em Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986) e, mais recentemente, Fukushima (2011), aliada à ausência de uma solução definitiva para a disposição do lixo atômico e os altos custos da geração reverteram, por ora, um possível renascimento, ocasionado pela necessidade global de descarbonizar a matriz energética do planeta. Como não há combustão no processo de produção de vapor para as térmicas nucleares, elas são consideradas fontes “limpas”, do ponto de vista de emissões de GEE.

Além da ocorrência dos acidentes, outro fator que motiva a oposição às nucleares é o fato de que o processo de fissão do átomo de urânio é o mesmo que dá origem à bomba atômica. Assim, o país que domina a tecnologia de processamento e transformação do minério pode utilizá-la tanto para a produção de energia elétrica quanto para fins bélicos (vide as árduas negociações com o Irã). Cabe esclarecer que o teor de U-235 de uma bomba atômica (de urânio) é superior a 95%, versus 4% de reatores para fins de geração elétrica.

Apesar do movimento de descomissionamento paulatino das usinas nucleares nos países da OCDE, a Agência Internacional de Energia projeta um aumento na geração global, até 2040, liderado pela China, que possui dezenas de usinas em construção.

2.5 - Fontes Renováveis de Energia

2.5.1 - Introdução

Um dos grandes desafios globais é garantir o fornecimento de energia para atender à crescente demanda, proporcionando a todos acesso a serviços de energia e reduzir a contribuição da energia para a mudança climática. Para os países em desenvolvimento, especialmente os mais pobres, a energia é necessária para estimular a produção, a geração de renda e desenvolvimento social, e reduzir os graves problemas de saúde causados pelo uso de lenha, carvão, esterco e resíduos agrícolas. Para os países industrializados, as principais razões para incentivar as energias renováveis incluem reduções de emissões para mitigar as mudanças climáticas, preocupação com um abastecimento energético seguro e criação de emprego. A energia renovável pode abrir oportunidades para abordar estas múltiplas dimensões de desenvolvimento ambiental, social e económico, incluindo a adaptação às alterações climáticas.

Alguma forma de recurso renovável está disponível em todo o mundo; por exemplo, radiação solar, vento, quedas d'água, ondas, marés e calor armazenado no oceano ou o calor da Terra. Além disso, existem tecnologias que podem aproveitar essas formas de energia. Enquanto as oportunidades parecem grandes, existem barreiras e problemas que retardam a introdução de energias renováveis nas economias modernas, tal como o nível excessivo de subsídios às energias fósseis, conforme visto no capítulo 1. Além disso, é importante frisar que a maioria dos cenários relativos a uma descarbonização da matriz energética (“transição energética”) preconizam geração elétrica em substituição a todas as demais fontes primárias fósseis e a partir exclusivamente de fontes renováveis, principalmente solar fotovoltaico (FV) e eólica, as chamadas energias “limpas”. O setor de petróleo tem algumas propostas de sistemas de captura de CO₂, eventual utilização parcial e posterior injeção no subsolo (CCUS²², sigla em inglês), de forma a atenuar suas emissões, mas nada efetivo.

Cabe notar que a energia elétrica até hoje é minoritária no que toca a demanda energética de todos os setores consumidores: indústria, edificações (habitações, lojas, escritórios, consultórios etc.), transporte e agricultura. A figura 2.22 mostra a lenta evolução da eletrificação dos citados setores e como a matriz elétrica ainda possui uma base pouco renovável. Por fim, cabe lembrar que mais de metade de toda a energia final renovável, ainda hoje, é representada pela biomassa tradicional, ou seja, lenha, resíduos agropecuários etc. utilizados para cocção e aquecimento por comunidades sem acesso às modernas formas de energia. Em pleno século XXI.

²²CCUS – captura, utilização e armazenamento de carbono

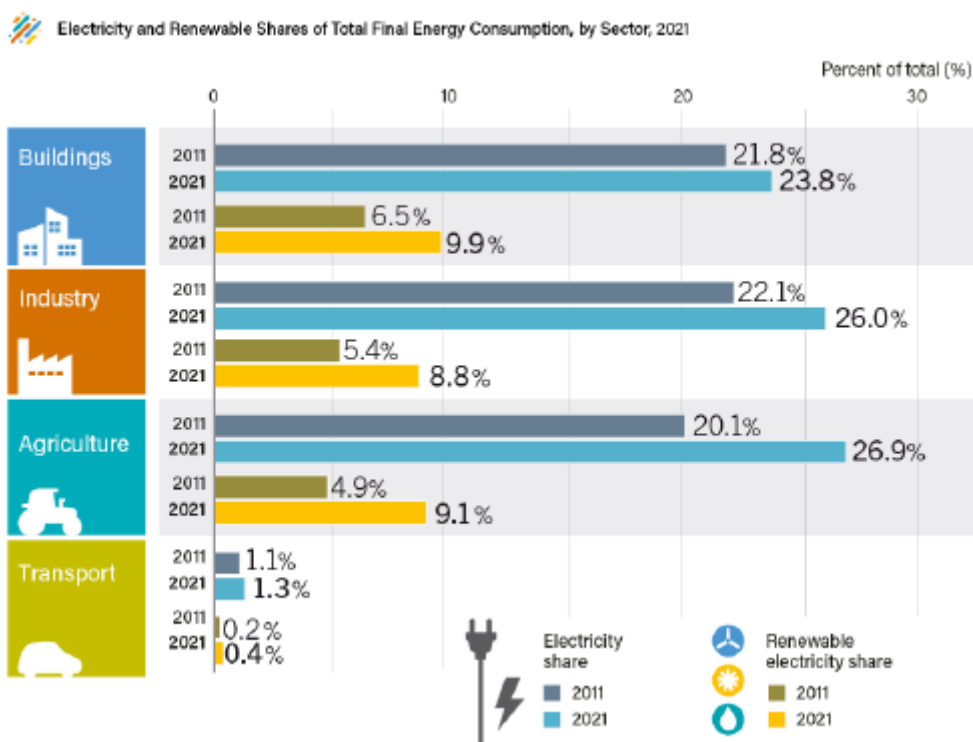


Figura 2.22 – Participação das Energias Renováveis no Consumo Global de Energia Final, em 2021

Fonte: REN21 – Renewables 2024: Global Status Report

Apesar da relativamente baixa representatividade, as energias renováveis tem tido um desempenho notável no setor elétrico, por conta de sua crescente competitividade.

O Custo Nivelado de Energia (LCOE, sigla em inglês) é uma métrica usada para calcular o custo médio de geração de eletricidade ao longo da vida útil de um ativo energético. Também é conhecido como "custo nivelado de eletricidade". O LCOE é calculado dividindo o custo anualizado total de um sistema pela carga elétrica total que ele atende. É um fator-chave na determinação da viabilidade e competitividade de um projeto de geração de energia.

O LCOE é usado para comparar diferentes tecnologias, como eólica, solar e gás natural, que têm diferentes períodos de vida, tamanhos de projeto, custos de capital, riscos, retornos e capacidades. Também é usado para determinar o preço mínimo pelo qual a energia deve ser vendida para que um projeto de energia atinja o ponto de equilíbrio. O LCOE considera os custos associados à construção e operação de um ativo energético ao longo de seu ciclo de vida, incluindo: custos de capital, combustível, manutenção e operação.

Segundo o IEA, hoje, as energias eólicas onshore e solar fotovoltaica são as fontes de geração elétrica mais baratas, competitivas da história, com um LCOE abaixo de US\$ 50/MWh produzido. As térmicas (GN, carvão e nuclear) tem um LCOE acima de US\$ 100/MWh. Não há mais competição entre as fontes fósseis e não-fósseis, do estrito ponto de vista econômico. Há grande

simbolismo no fato de que, em 2024, o Reino Unido, berço da Revolução Industrial, fechou sua última usina termelétrica a carvão.

Particularmente, para os países em desenvolvimento, a ligação entre o desenvolvimento económico e social e a necessidade de serviços modernos de energia é evidente. Devido à sua natureza descentralizada, tecnologias de energias renováveis podem desempenhar um papel importante na promoção do desenvolvimento rural. Em 2022, existiam 13,7 empregos no setor de energias renováveis, uma das principais áreas em crescimento da economia global.

A COP 21 em Paris ratificou o entendimento das nações de todo o mundo de que, para minimizar os impactos das mudanças climáticas antropogênicas, é urgente a descarbonização da matriz energética mundial. Um grande problema é que, pela primeira vez, o mundo está se movendo para explorar novas fontes de energia que são, em muitos aspectos, menos úteis e convenientes do que as fontes fósseis. Até agora, temos sempre ido para um combustível melhor e o petróleo provou ser o melhor de todos, mesmo comparado a carvão ou gás. Petróleo é densamente embalado com energia, facilmente transportado e armazenado, e eficiente na liberação de sua energia nos motores modernos. Não à toa, continua sendo o principal energético do planeta.

As energias renováveis são outra questão. Fontes de combustível como etanol de milho ou lascas de madeira tendem a ser volumosos e seu conteúdo energético é difuso. Culturas agro energéticas, fazendas eólicas e solares demandam muita terra; a energia que fornecem, muitas vezes, é intermitente e difícil de armazenar. O fato é que não se consegue propulsionar um avião com energia fotovoltaica, pois a densidade de potência da energia solar é muito mais baixa do que a de combustíveis líquidos.

Nos confrontamos com uma sociedade moderna, urbana, construída sobre a energia de alta qualidade, formas densas de energia, combustíveis fósseis, especialmente. Será possível manter o mesmo padrão de vida com energias renováveis? Ninguém realmente sabe, mas as estruturas energéticas terão que sofrer mudanças fundamentais.

Existem amplas evidências de que existe uma percepção de escassez de terras para atender à crescente demanda por alimentos. A figura 2.23 ilustra como as fontes renováveis se caracterizam pela baixa²³ densidade de potência (W/m²), em comparação às fontes e conversores fósseis. Além disso, a intermitência intrínseca de várias fontes renováveis (eólica, solar FV, ondas, marés) impacta num ponto crucial, a qualidade de fornecimento, visto a energia elétrica não ser, ainda, passível de acumulação de forma econômica, apesar de uma revolução nas tecnologias de baterias estar em curso, conforme será visto no capítulo 4.

²³ Por exemplo, as usinas nucleares Angra I e II possuem potência instalada de 2.000 MW e ocupam 13 hectares. As usinas solares CSP da Abengoa, Espanha, possuem 30 MW e ocupam 90 hectares.

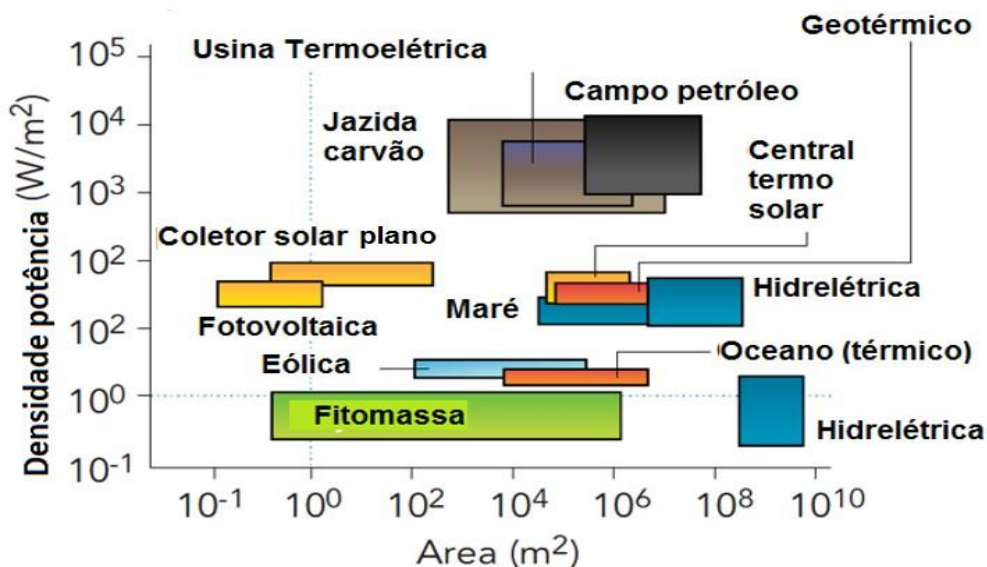


Figura 2.23 – Densidade espacial de potência de conversores e recursos energéticos

Fonte: KERR (2010)

Apesar da inércia histórica dos sistemas energéticos, existem recursos técnicos renováveis disponíveis que permitem, mesmo com possíveis conflitos pelo uso da terra, vislumbrar um futuro sem a presença de fontes fósseis de energia. Desconsiderando as demais fontes renováveis, o potencial técnico²⁴ da energia solar direta (eólica, biomassa etc. são formas indiretas de energia solar) atende amplamente a demanda de energia primária do mundo.

2.5.2 - Energia Solar

A energia solar constitui a radiação térmica emitida pela camada externa do Sol. Fora da atmosfera da Terra, essa radiação, chamada irradiância solar, tem uma magnitude de potência média de 1.367 W/m² ("constante solar") para uma superfície perpendicular aos raios do sol. Ao nível do solo (geralmente especificado como ao nível do mar com o sol a pino), esta irradiância é atenuada pela atmosfera a cerca de 1.000 W/m² em condições de céu claro dentro de algumas horas de meio-dia uma condição chamada de 'sol pleno'. Fora da atmosfera, a energia do Sol é constituída por ondas eletromagnéticas, com comprimentos de onda que variam de cerca de 0,25 a 3 mm. Parte da irradiação solar é uma contribuição de raios que chegam diretamente do sol sem ser espalhados na atmosfera. Este irradiância 'direta', que é capaz de ser concentrada por espelhos e lentes, é mais disponível em áreas de baixa cobertura de nuvens. A irradiância restante é chamado de difusa. A soma das duas é chamada de irradiância solar global.

²⁴ Potencial técnico" é a quantidade de energia renovável obtida para plena implementação de tecnologias ou práticas demonstradas. Não é feita qualquer referência explícita aos custos, barreiras ou políticas.

As estimativas para o potencial técnico da energia solar variam de 1.575 a 49.837 EJ/ano, ou seja, de 3 a 100 vezes o atual consumo global de energia primária. As tecnologias de energia solar direta são de natureza diversa. As principais seguem abaixo:

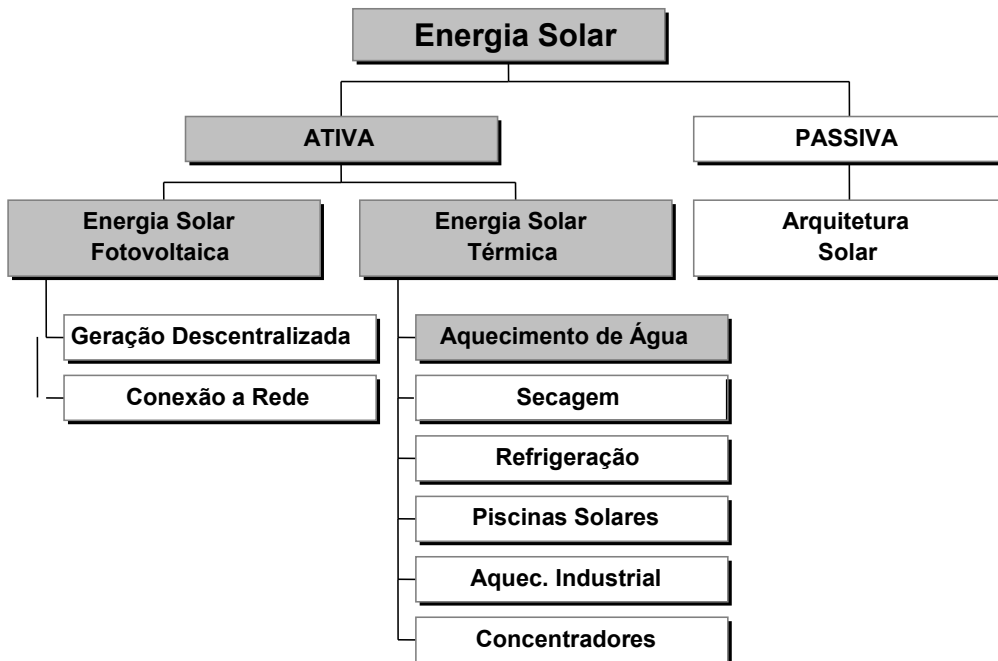


Figura 2.24 – Classes de Uso da Energia Solar

2.5.2.1 - Energia Solar Térmica

A componente chave em sistemas térmicos solares ativos é o coletor solar. Coletores solares são aquecedores de fluidos (líquidos ou gasosos) e são classificados em coletores concentradores e coletores planos, em função da existência ou não de dispositivos de concentração da radiação solar. O fluido aquecido pode ser mantido em reservatórios termicamente isolados até o seu uso final. Os coletores concentradores estão associados a aplicações em temperaturas superiores a 100 °C, podendo alcançar temperaturas de até 400 °C para o acionamento de turbinas a vapor e posterior geração de eletricidade. Já os coletores planos são utilizados em geral em aplicações residenciais e comerciais em baixas temperatura, tais como: água aquecida para banho, ar quente para secagem de grãos, aquecimento de piscinas, água aquecida para limpeza em hospitais e hotéis etc. A figura 2.25 mostra um esquemático de um sistema de aquecimento térmico com coletor plano.

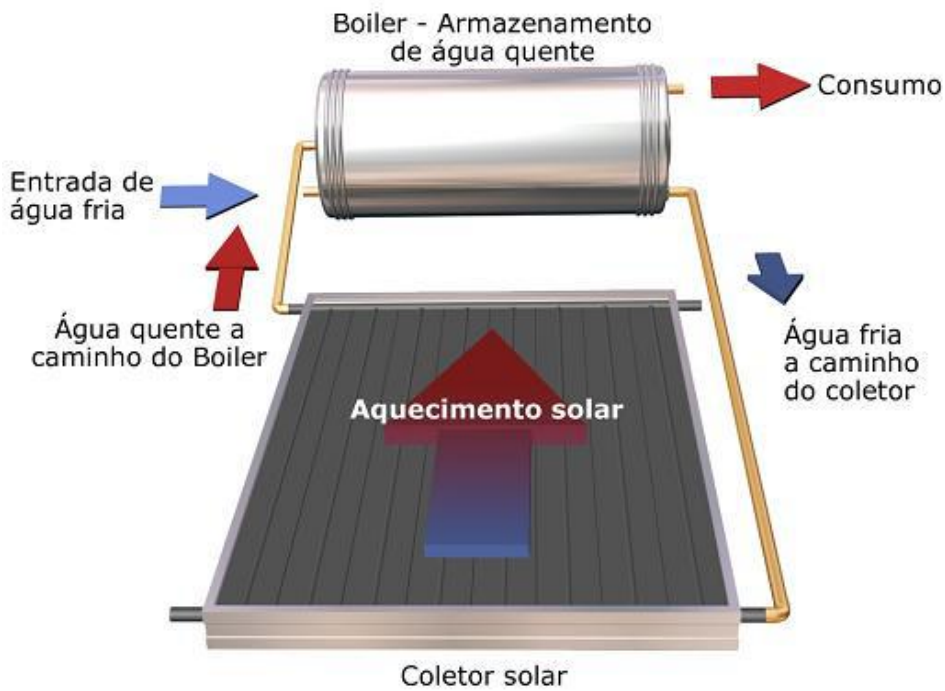


Figura 2.25 – Esquema de Aquecedor Térmico de Coletor Plano

Fonte: Soletrol

Os coletores planos, mais disseminados, podem ser classificados da seguinte forma:

- Coletor aberto: o tipo mais simples de coletor termossolar: consiste em um revestimento de plástico preto, frequentemente utilizado para aquecer a água em piscinas. Atinge temperatura entre 30 - 40 °C.
- Coletor plano: O absorvedor metálico de energia solar é montado em uma embalagem que reduz a taxa de perda de calor graças ao isolamento térmico e um painel de vidro. Operam geralmente entre 60 - 90 °C.
- Coletor a vácuo: Neste, o nível de perda de calor é reduzido de forma significativa, graças à elevada pressão negativa nos tubos de vidro. Um coletor é composto de vários tubos de vácuo.

2.5.2.2 - Energia Heliotermelétrica (CSP)

Plantas de médio e grande porte utilizando sistemas ópticos (lentes, espelhos) para concentração da radiação solar e aquecimento de fluidos a altas temperaturas são denominadas de CSP (Concentrated Solar Power). Quatro tecnologias CSP são usadas: cilindros parabólicos, torres solares, coletores lineares de Fresnel e concentradores ("discos") parabólicos. Nas três primeiras tecnologias, normalmente o calor captado é usado na produção de vapor e posterior acionamento de turbinas para fins de geração de energia elétrica. Na última, a energia elétrica é gerada em motores Stirling. As tecnologias apresentam diferentes níveis de maturidade, variando desde a viabilidade comercial dos cilindros parabólicos - que dominam o mercado com

90% da potência instalada, passando por plantas pilotos comerciais com torres solares, a projetos pilotos com concentradores de Fresnel. As potências destas plantas podem variar de uma dezena de kW, nos sistemas Stirling, até centenas de MW, em plantas com cilindros parabólicos. A figura 2.26 mostra o arranjo dos espelhos concentradores em cada uma das quatro tecnologias citadas acima, ao passo que a tabela 2.6 faz um comparativo técnico:

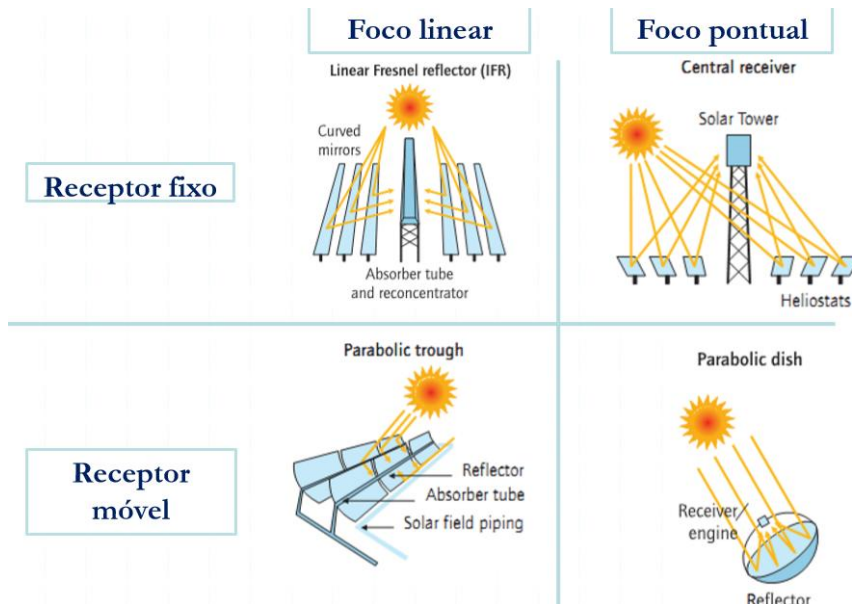


Figura 2.26 - Tipos de arranjos de concentração de coletores solares térmicos

Tabela 2.6 - Comparativo das diferentes tecnologias CSP

	Cilindrico-parabólico	Torre	Prato parabólico	Fresnel
Experiência comercial	> 20 anos	< 4 anos	-	-
Risco Tecnológico	Baixo	Médio	Alto	Médio
Escala ótima de capacidade de geração	50 MW até > 100 MW	50 MW até > 100 MW	100 kW até > 100 MW	50 MW até > 100 MW
Requerimento de construção	Exigente	Exigente	Moderado	Simple para Moderado
Temperatura de operação	300°C-550°C	260°C-570+°C	750°C	270°C
Eficiência	14-16%	15-22%	24-31%	9-11%
Armazenamento	Sim	Sim	Não	Sim
Custo de energia nivelado (\$/kWh)	Atual: 0.30-0.75 Futuro: 0.06-0.08	Atual: 0.20-0.9 Futuro: 0.06-0.08	Futuro: 0.05-0.08	Futuro: 0.06-0.08
Uso de água	Alto	Alto	Baixo	Médio
Requerimento de terra	Alto	Alto	Variável / flexível	Variável
Principais desenvolvedores	Acciona Solar, Abengoa Solar / Abener, Solar Millenium, Solel / Siemens	Abengoa Solar / Abener, Bright Source Energy, Torresol, eSolar	Tessera Solar /Stirling Energy Systems (SES)	Ausra / Areva (small scale projects), Novatec Solar

Fonte: CEPEL/CRESESB

Uma grande vantagem dos sistemas solares térmicos é a possibilidade de serem acoplados a sistemas de armazenamento de calor para uso em outros horários, que não coincidem com a incidência solar. Isso traz uma maior flexibilidade no despacho de energia elétrica, em

comparação aos sistemas fotovoltaicos, além de maior eficiência no processo de conversão de energia e de uma gama de aplicação mais ampla. Outra vantagem é a possibilidade de integração com outras aplicações que necessitem de energia térmica. Segundo REN21 (2017), todos os sistemas CSP que entraram em operação em 2016 (110 MW total) continham sistemas térmicos de armazenamento de energia.

Um dos grandes desafios que se coloca para o segmento industrial solar térmico é a queda significativa dos preços dos módulos fotovoltaicos, que tornam estes mais competitivos. Segundo REN21 (2017), ao final de 2016, haviam 4,8 GW de sistemas CSP no mundo, sendo que a Espanha e os EUA respondem por cerca de 90% do total.

2.5.2.3 - Energia Solar Fotovoltaica (FV)

Ao longo desta década, a taxa de crescimento na produção de sistemas fotovoltaicos tem sido revolucionária, inédito na história. Em 2004, o mundo levou um ano inteiro para instalar 1 gigawatt (bilhão de watts) de capacidade de energia solar FV; em 2010, levou um mês; em 2016, uma semana, em 2023, houve dias quando um gigawatt foi instalado em todo o mundo. Analistas estimam até 655 GW de capacidade instalada: isso é, cerca de dois 2004s por dia.

Esse crescimento extraordinário decorre da interação de três fatores simples. Quando as indústrias produzem mais de algo, elas o fazem de forma mais barata. Quando as coisas ficam mais baratas, a demanda por elas cresce. Quando a demanda cresce, mais é produzido. No caso da energia solar, a demanda foi criada e sustentada por subsídios no início deste século por tempo suficiente para que a queda dos preços se tornasse notável e, logo depois, previsível. O feedback positivo que impulsiona o crescimento exponencial decolou em escala global.

E a redução dos custos não mostra sinais de parar ou mesmo desacelerar, como pode ser visto na figura 2.27. Comprar e instalar painéis solares é atualmente a maior categoria única de investimento em geração de eletricidade, de acordo com a Agência Internacional de Energia. Ela espera US\$ 500 bilhões este ano, não muito abaixo da soma que está sendo colocada na exploração de petróleo e gás natural. A capacidade instalada está dobrando a cada três anos. De acordo com a Sociedade Internacional de Energia Solar, a energia solar está a caminho de gerar mais eletricidade do que todas as usinas nucleares do mundo em 2026, do que suas turbinas eólicas em 2027, do que suas hidrelétricas em 2028, suas usinas a gás em 2030 e suas usinas a carvão em 2032. Em um cenário da IEA que fornece emissões líquidas zero de dióxido de carbono até meados do século, a energia solar se torna a maior fonte de energia primária da humanidade — não apenas eletricidade — até a década de 2040.

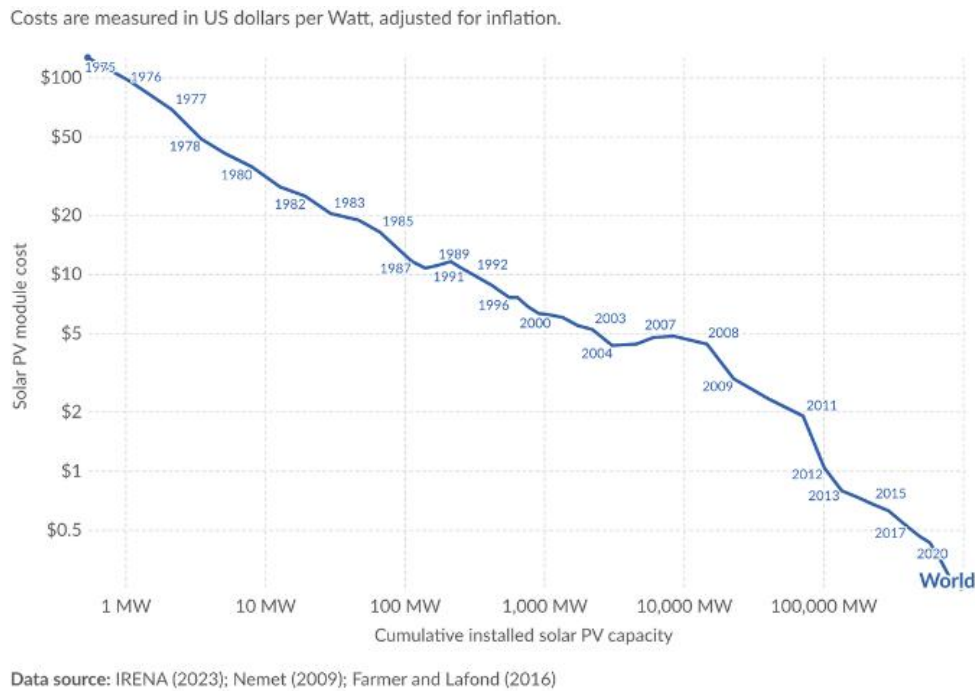


Figura 2.27 – Evolução dos custos de painéis solares, entre 1976 e 2022

O crescimento da energia solar não depende de esforços para estabilizar o clima; se continuar ficando mais barato, crescerá mesmo que as pessoas persistam em queimar carvão e petróleo junto com ela. Estudo recente buscou ver o que aconteceria se os custos da energia solar e de outras novas tecnologias continuassem caindo com o aumento da implantação, como fizeram no passado. Num cenário de “transição rápida”, descobriu-se que até 2070 o mundo poderia estar obtendo mais energia útil de células solares do que obteve de todas as fontes de energia combinadas.

Por outro lado, existem 1.500 GW de projetos de energias renováveis em estágios avançados paralisados em 2023 devido à licenciamento e permissão de acesso à rede de transmissão/distribuição. Os investimentos na rede elétrica atingiram US\$ 300 bilhões, em 2023, mas estima-se que sejam necessários quase 5 US\$ trilhões até 2030 para sanar os gargalos, o que pode retardar a instalação dos referidos parques geradores, a maioria de sistemas FV.

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica um dispositivo fabricado com material semicondutor. O módulo fotovoltaico é uma unidade básica, formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas com o objetivo de gerar energia elétrica, e se constitui na unidade comercial do gerador fotovoltaico.

A eficiência típica de módulos FV comerciais segue na tabela 2.7. Os dois principais fatores que afetam a eficiência da conversão FV são a temperatura ambiente de operação (reduz a voltagem do painel) e a intensidade da irradiação solar incidente (reduz a corrente do painel). Este último fator é afetado tanto pela nebulosidade local quanto pelo ângulo de inclinação da célula em

relação ao sol. A eficiência da conversão se reduz ao longo da vida útil das células, a uma taxa típica de 0,7% ao ano.

Tabela 2.7: Eficiência típica de módulos FV comerciais

Tecnologia	Eficiência típica de módulos comerciais	Eficiência dos melhores módulos (em laboratório)
Silício cristalino		
Monocristalino	17 a 21,5%	22,9%
Policristalino	14 a 17%	18,5%
Filmes finos		
Silício amorfo (a-Si)	4 a 8%	10,9%
Telureto de Cádmio (CdTe)	10 a 16,3%	18,2%
Disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS)	12 a 14,7%	17,5%
Concentrador fotovoltaico (CPV)	27 a 33%	38,9%

Fonte: EPE – Energia Renovável (2016)

Nas estimativas de produção de energia elétrica, é útil ignorar os efeitos de variação da irradiância a cada instante e considerar a totalidade da energia elétrica convertida em intervalos horários. Como há uma forte linearidade entre a produção de energia e a irradiação horária, este conceito pode ser estendido, gerando uma forma bastante conveniente de se expressar o valor acumulado de energia solar ao longo de um dia: o número de Horas de Sol Pleno (HSP). Esta grandeza reflete o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer constante e igual a 1 kW/m² (1.000 W/m²), de forma que a energia resultante seja equivalente à energia disponibilizada pelo Sol no local em questão, acumulada ao longo de um dado dia. A Figura 2.28 ajuda na compreensão da grandeza Horas de Sol Pleno.

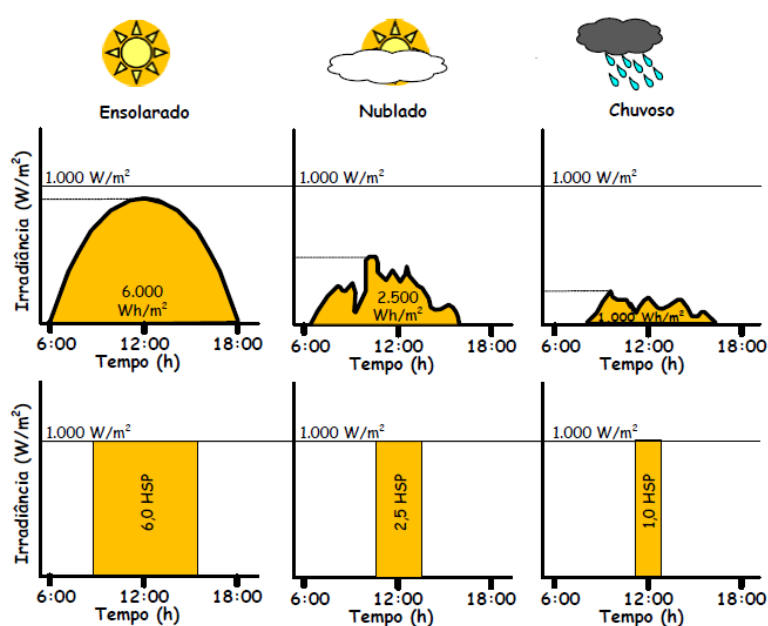


Figura 2.28 Perfis de radiação solar diária com valores equivalentes de HSP

Fonte: CEPEL – Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos (2014)

Existem outras restrições. Dada a propensão das pessoas a viver fora do horário de luz do dia, a energia solar precisa ser complementada com armazenamento e suplementada por outras tecnologias. A indústria pesada, a aviação e o frete têm sido difíceis de eletrificar. Felizmente, esses problemas podem ser resolvidos à medida que as baterias e os combustíveis criados pela eletrólise se tornam gradualmente mais baratos.

2.5.3 - Energia Hidrelétrica

A hidroeletricidade é a energia proveniente do movimento das águas. Para produzi-la, é necessário integrar a vazão do rio, a quantidade de água disponível em determinado período de tempo e os desníveis do relevo, sejam eles naturais, como quedas d'água, ou artificiais.

A estrutura da usina (UHE) é composta, basicamente, por barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro, que funcionam em conjunto e de maneira integrada. A barragem tem por objetivo interromper o curso normal do rio e permitir a formação do reservatório. Além de “estocar” a água, esses reservatórios têm outras funções: permitem a formação do desnível necessário para a configuração da energia hidráulica, a captação da água em volume adequado e a regularização da vazão dos rios em períodos de chuva ou estiagem. Algumas usinas hidroelétricas são chamadas “a fio d'água”, ou seja, próximas à superfície e utilizam turbinas que aproveitam a velocidade do rio para gerar energia. Usinas fio d'água reduzem as áreas de alagamento e não formam reservatórios para estocar a água. Ou seja, a ausência de reservatório diminui a capacidade de armazenamento de água, única maneira de poupar energia elétrica para os períodos de seca.

Os sistemas de captação e adução são formados por túneis, canais ou condutos metálicos que têm a função de levar a água até a casa de força. É nesta instalação que estão as turbinas, formadas por uma série de pás ligadas a um eixo conectado ao gerador. Durante o seu movimento giratório, as turbinas convertem a energia cinética (do movimento da água) em energia elétrica por meio dos geradores que produzirão a eletricidade. Depois de passar pela turbina, a água é restituída ao leito natural do rio pelo canal de fuga. Os principais tipos de turbinas hidráulicas são: Pelton, Kaplan, Francis e Bulbo. Cada turbina é adaptada para funcionar em usinas com determinada faixa de altura de queda e vazão.

Por último, há o vertedouro. Sua função é permitir a saída da água sempre que os níveis do reservatório ultrapassam os limites recomendados. Uma das razões para a sua abertura é o excesso de vazão ou de chuva. Outra é a existência de água em quantidade maior que a necessária para o armazenamento ou a geração de energia. Em períodos de chuva, o processo de abertura de vertedouros busca evitar enchentes na região de entorno da usina.

As Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCHs) são instalações hidroelétricas de pequenas dimensões (no caso do Brasil, até 30 MW). Neste tipo de empreendimento verifica-se o aproveitamento de um desnível natural do curso de água, para se instalar uma pequena turbina. Neste caso, em geral, os impactos ambientais são mais reduzidos do que os associados a aproveitamentos de maiores dimensões e confinados ao local de instalação. A figura 2.29 mostra um desenho esquemático de uma Usina Hidrelétrica (UHE).

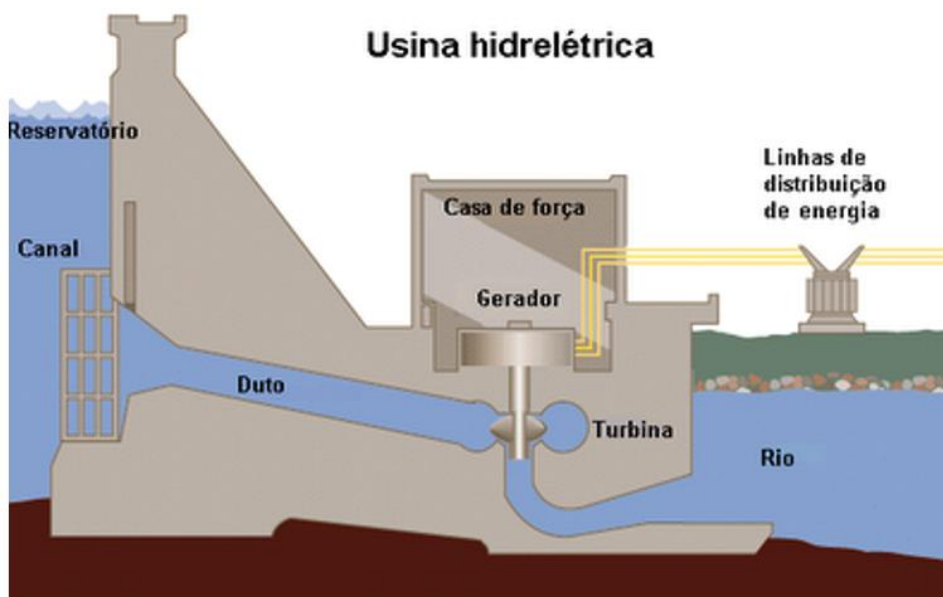


Figura 2.29 – Usina Hidrelétrica

As turbinas de UHEs podem ser divididas nos seguintes tipos:

Turbina de impulso (ou ação): o trabalho mecânico é obtido por meio da energia cinética do fluxo de água pelo rotor da turbina. São usadas preferivelmente para quedas altas e baixas taxas de escoamento, em que toda a pressão da água é convertida em energia cinética. Exemplo desta turbina é a Pelton;

Turbinas de reação: o trabalho mecânico é realizado por meio da transformação das energias cinética e de pressão do fluxo de água no rotor da turbina. São empregadas em baixas e médias quedas de água. Os exemplos mais conhecidos são as turbinas Francis (usadas em Itaipu, Tucuruí, Furnas, 3 Gargantas (China) e quase todas as PCHs) e Kaplan²⁵ (Três Marias e Barra Bonita).

²⁵ A turbina hélice é uma versão da turbina Kaplan, mas tem as pás fixas e possui eixo vertical. A turbina hélice de eixo horizontal é chamada de bulbo. A turbina tipo Bulbo é usada nas usinas fio d'água por ser indicada para baixas quedas (até 20 mt) e altas vazões, não exigindo grandes reservatórios. A UHE Jirau possui as maiores turbinas bulbo do mundo (44 x 75 MW).

Geradores de tipo de reação são boas escolhas se há amplo abastecimento de água, mas pouca queda. Estão sujeitas a maiores perdas por atrito do que uma de impulso, mas tem maior flexibilidade na instalação.

De toda forma, cabe frisar que as UHEs, por não utilizarem máquinas térmicas na conversão elétrica, não estão sujeitas aos limites impostos pela lei de Carnot (e que confinam a maioria das UTEs a eficiências em torno de 35%). Assim, elas apresentam eficiências acima de 90%, índice mais alto do que a de qualquer outro conversor elétrico disponível comercialmente.

Por outro lado, a hidroeletricidade deve, nas próximas décadas, perder posição relativa às demais fontes renováveis de geração elétrica. Além da dificuldade crescente em encontrar aproveitamentos apropriados (em particular, nos países da OCDE, cujo potencial está próximo ao esgotamento), existem críticas severas quanto aos impactos que as UHEs causam ao regime hidrológico dos rios nos quais elas se encontram. Isto tem levado o Brasil, por exemplo, a construir crescentemente usinas fio d'água, particularmente, na bacia Amazônica. Outro impacto ambiental diz respeito às emissões de GEE (CO₂ e CH₄), por conta dos sedimentos oriundos de matéria orgânica que se deposita no fundo das barragens, conforme ilustrado pela figura 2.30

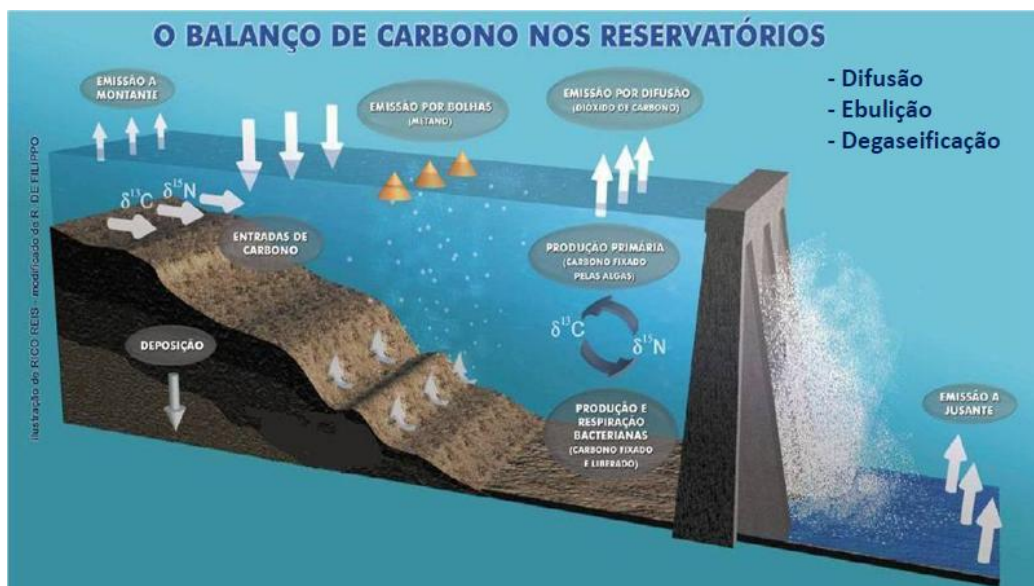


Figura 2.30 – Balanço de Carbono nos Reservatórios de UHEs

Fonte: Amorim (2015)

Segundo REN21 (2017), a capacidade instalada mundial de UHEs, ao final de 2016, era de 1096 GW, sendo que o Brasil ocupava o 2º posto, com 97 GW. A China apresenta 28% do parque hídrico mundial, com 306 GW.

2.5.4 - Energia Eólica

A energia eólica tem origem na energia solar. É uma forma de energia cinética produzida pelo aquecimento diferenciado das camadas de ar, originando uma variação da massa específica e gradientes de pressão. Além disso, também é influenciada pelo movimento de rotação da Terra sobre o seu eixo e depende significativamente de influências naturais, como: continentalidade, maritimidade, latitude, altitude. As formas de aproveitamento dessa energia estão associadas à conversão da mesma em energia mecânica e elétrica.

Sua energia cinética tem sido aproveitada há milhares de anos para deslocar embarcações, fazer funcionar moinhos de vento ou bombeamento de água. O uso da energia eólica para gerar eletricidade em escala comercial, no entanto, tornou-se viável apenas na década de 1970, como resultado de avanços técnicos e apoio de alguns governos. Diferentes tecnologias de energia eólica estão disponíveis em uma variedade de aplicações, mas o principal uso da energia eólica de relevância para a mitigação das mudanças climáticas é gerar eletricidade a partir de grandes turbinas eólicas conectadas à rede, implantado tanto em terra ('onshore') ou no mar ("offshore").

Em um número crescente de países, a energia eólica é a mais competitiva de todas para novas instalações. Entre as “novas” renováveis, é a fonte que ainda tem maior capacidade instalada no mundo..

A energia eólica terrestre já está sendo implantado em um ritmo rápido em muitos países, e não existem barreiras técnicas insuperáveis que impedem o aumento dos níveis de penetração de energia eólica em sistemas de abastecimento de energia elétrica. Além disso, embora a velocidade média do vento varie consideravelmente por localização, amplo potencial técnico existe na maioria das regiões do mundo para permitir a implantação significativa, em termos de escala. Em algumas áreas com bons recursos eólicos, o custo da energia eólica já é competitivo com os preços atuais do mercado de energia, mesmo sem considerar os impactos ambientais relativos. No entanto, na maioria das regiões do mundo, medidas políticas ainda são necessárias para garantir uma rápida expansão. Avanços contínuos em tecnologia da energia eólica onshore e offshore tem reduzido os custos de geração, em particular, do último.

A quantidade de energia eólica extraível numa região depende das características de desempenho, altura de operação e espaçamento horizontal dos sistemas de conversão de energia eólica instalados. Para qualquer fluido em movimento, a velocidade do fluxo aumenta na medida em que este se afasta das superfícies que o delimitam. Portanto, a velocidade do vento aumenta com a altura em relação à superfície da Terra, de forma dependente da rugosidade do terreno. Em terrenos planos (baixa rugosidade) esta variação é menos significativa do que em terrenos irregulares (alta rugosidade), caso das áreas urbanas. Por isso, as máquinas eólicas são geralmente instaladas em torres elevadas, onde as velocidades são significativamente maiores do que na superfície.

Desta forma, para garantir crescentes escalas de produção e eficiência, as áreas de captação da energia cinética dos ventos (coletada pelas hélices) têm crescido de acordo, conforme a figura 2.31.

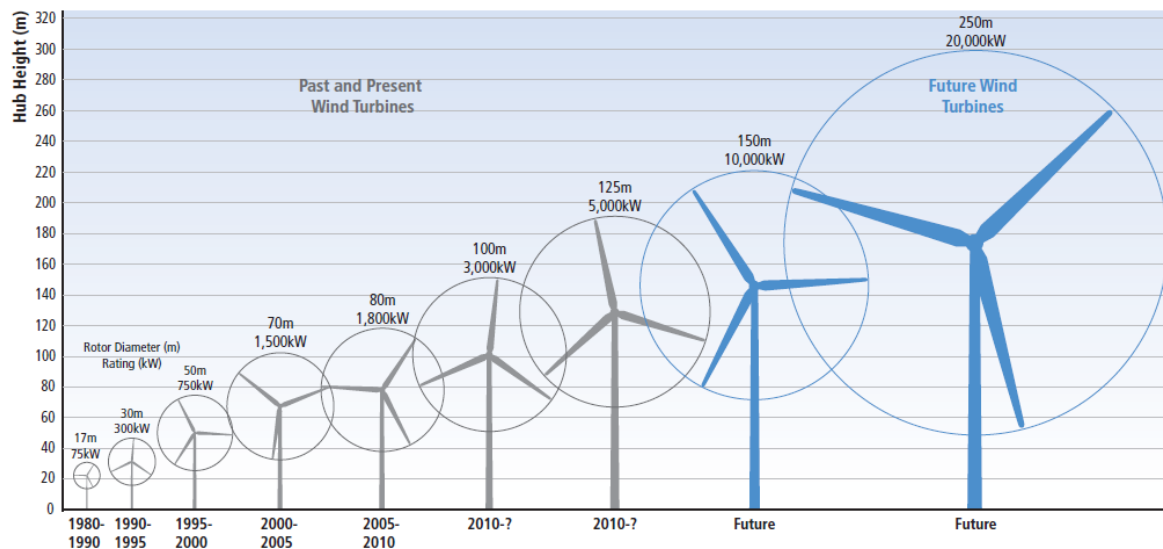


Figura 2.31 - Evolução da potência típica de aerogeradores eólicos

Atualmente as máquinas de grande porte disponíveis são em maioria tripás de eixo horizontal. Entretanto, existem máquinas com uma, duas, quatro ou mais pás de eixo horizontal, além de máquinas de eixo vertical. Entretanto, essas inúmeras variantes são normalmente utilizadas apenas para máquinas de pequeno porte.

Ventos com baixa velocidade não têm energia suficiente para acionar as máquinas eólicas, que só funcionam a partir de uma determinada velocidade (normalmente varia entre 2,5m/s e 4,0m/s). Com o aumento da velocidade do vento, a potência no eixo da máquina aumenta gradativamente até atingir a potência nominal do aerogerador, que ocorre com velocidades que variam, geralmente entre 9,5 m/s e 15,0 m/s. Para velocidades superiores à nominal, em muitas máquinas, a potência permanece constante até uma velocidade de corte superior, na qual a turbina deve sair automaticamente de operação para evitar que sofra danos estruturais. A energia disponível varia com o cubo da velocidade do vento, de forma que o dobro de velocidade representa um aumento de oito vezes em energia.

Os equipamentos de pequeno porte têm impacto ambiental geralmente desprezível. Já os impactos ambientais de parques eólicos podem ser classificados em:

- Uso da terra – em parques eólicos as turbinas devem estar suficientemente distanciadas entre si para evitar a perturbação causada no escoamento do vento entre uma unidade a outra. Estes espaçamentos devem ser no mínimo de 5 a 10 vezes a altura da torre. Contudo a área do parque pode ser aproveitada para produção agrícola ou atividades de lazer;

- Ruído – as turbinas de grande porte geram ruído audível significativo, de forma que existe regulamentação relativa à sua instalação na vizinhança de áreas residenciais. Entretanto, nas turbinas mais modernas o nível de barulho tem sido reduzido. O ruído é proveniente de duas fontes: o próprio fluxo de ar nas pás e os mecanismos (gerador, caixa de redução);
- Impactos visuais – as pás das turbinas produzem sombras e/ou reflexos móveis que são indesejáveis nas áreas residenciais; este problema é mais evidente em pontos de latitudes elevadas, onde o sol tem posição mais baixa no céu. Dentre outros parâmetros que se podem relacionar são: o tamanho da turbina, seu design, números de pás, cor e números de turbinas em uma fazenda eólica. As máquinas de grande porte são objetos de muita visibilidade e interferem significativamente nas paisagens naturais; por isso podem existir restrições à sua instalação em algumas áreas (por exemplo, em áreas turísticas ou áreas de grande beleza natural);
- Aves – em fazendas eólicas ocorre mortalidade de aves por impacto com as pás das turbinas (acredita-se que os animais não conseguem enxergá-las, quando estão em movimento), por isso não é recomendável a sua instalação em áreas de migração de aves, áreas de reprodução e áreas de proteção ambiental.
- Interferência eletromagnética – esta acontece quando a turbina eólica é instalada entre os receptores e transmissores de ondas de rádio, televisão e microondas. As pás das turbinas podem refletir parte da radiação eletromagnética em uma direção, tal que a onda refletida interfere no sinal obtido.

Para minimizar os impactos ambientais, tem havido um crescente desenvolvimento na instalação de sistemas eólicos “offshore”. Estes parques, situados a certa distância da costa, possuem várias vantagens em relação aos equivalentes em terra: Não ter limitações em termos de utilização do solo e dos diversos impactos visuais. Tampouco há problemas com impactos sonoros, devido à distância da costa.

A superfície do mar tem baixa rugosidade, daí as turbinas não necessitam de grandes alturas, quando comparadas com instalações em terra. Globalmente, a turbulência do vento é muito inferior no mar, devido à ausência de barreiras. Assim, as turbinas não sofrem tanto desgaste, aumentando sua vida útil.

Com o aumento da penetração da energia eólica, preocupações sobre a integração desta fonte aos sistemas elétricos também aumentam. A natureza e a magnitude do desafio da integração dependerão das características do sistema elétrico existente e o nível de penetração de energia eólica, apesar destes desafios de integração não serem exclusividade desta fonte. Análise e experiência operacional, principalmente a partir de determinados países da OCDE sugeria que, em níveis de penetração de energia eólica até ~ 20% da demanda total anual média elétrica de energia, a integração da energia eólica geralmente não apresentaria nenhuma barreira técnica insuperável e seria economicamente administrável. No entanto, esta barreira já foi ultrapassada por inúmeros países, como Dinamarca, Irlanda, Portugal e Uruguai.

2.5.5 - Bioenergia

A bioenergia pode ser produzida a partir de uma variedade de matérias-primas de biomassa, incluindo resíduos florestais, agrícolas e pecuários; plantações florestais de pequena rotação; culturas energéticas; o componente orgânico dos resíduos sólidos urbanos etc. Através de uma variedade de processos, estas matérias-primas podem ser usadas diretamente para produzir eletricidade ou calor, ou podem ser usadas para criar combustíveis gasosos, líquidos ou sólidos. A figura 2.32 mostra as inúmeras rotas de conversão de biomassa e a amplitude única dos energéticos produzidos.

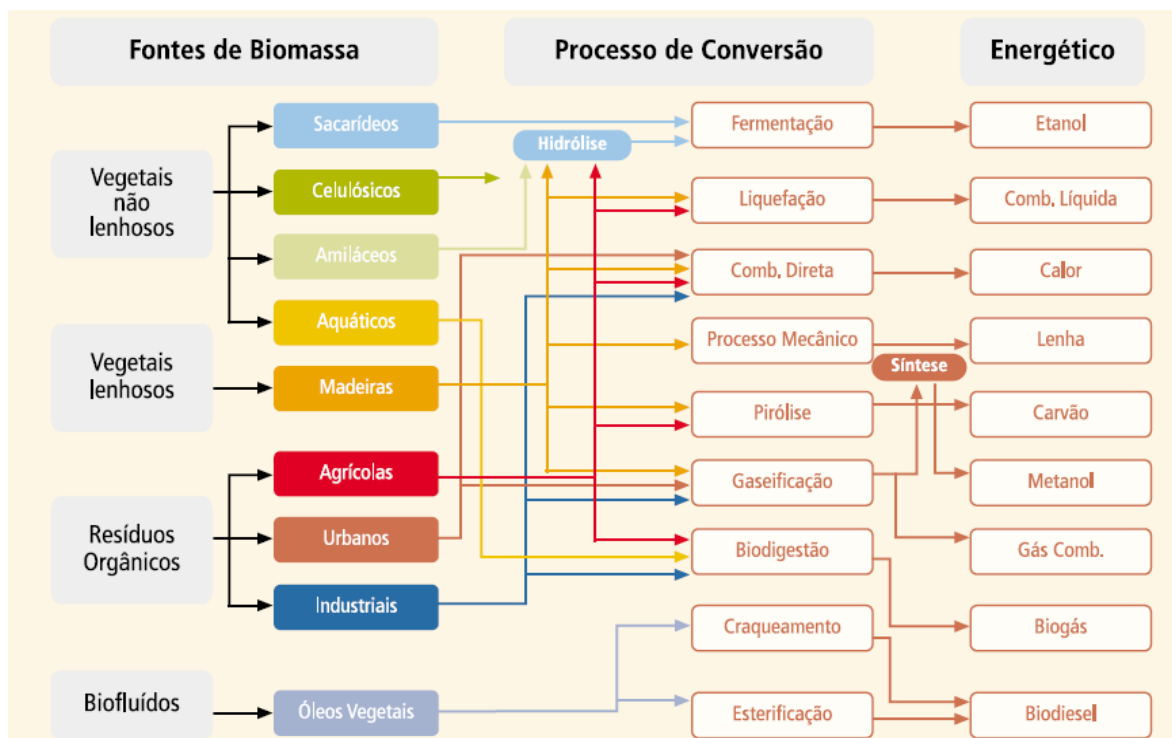


Figura 2.32 – Rotas de conversão bioenergética

A bioenergia é incorporada em formas complexas nos sistemas globais de biomassa para a produção de alimentos, fibras e produtos florestais, bem como na gestão de resíduos. Talvez o mais importante, a bioenergia tem um papel íntimo e crítico na subsistência diária de bilhões de pessoas nos países em desenvolvimento. A expansão da produção de bioenergia de forma significativa exigirá sofisticada gestão da terra e uso da água; para proporcionar ganhos de produtividade de matéria-prima para as diversas finalidades, incluindo energia. Neste caso, há que se investir em melhorias substanciais de conversão e uma compreensão refinada das complexas interações com questões ambientais e sociais associados à produção e uso de bioenergia.

Estudo conduzido pelo IPCC mostra a vantagem, em termos de emissões de GEE, de vários bioenergéticos frente a equivalentes fósseis, tanto para o setor de transportes, quanto para geração elétrica e de calor. Isto é explicado pelo fato de existir um processo de captura natural

de CO₂ atmosférico durante o crescimento da biomassa precursora do bioenergético, via a fotossíntese. Os combustíveis fósseis, por outro lado, são oriundos de material que se encontrava no subsolo e que, no processo de extração, transporte a um centro de transformação, distribuição e combustão emite CO₂ ao longo de toda a cadeia.

Foi visto na seção 2.1 que bioenergia contribui mais para a oferta de energia primária do que qualquer outra fonte de energia renovável. A energia de biomassa se divide em duas grandes categorias, conforme abaixo:

- Biomassa tradicional (baixa eficiência) - lenha, palha, esterco e outros estrumes são usados para cocção, iluminação e aquecimento de espaços, geralmente pelas populações mais pobres dos países em desenvolvimento. Esta biomassa é em geral queimada, criando impactos negativos graves nas condições de vida e saúde. .
- Bioenergia moderna (alta eficiência) - sólidos líquidos e gases mais convenientes são portadores de energia secundária para gerar calor, eletricidade e combustíveis de transporte para diversos setores. Biocombustíveis líquidos incluem etanol e biodiesel para o transporte rodoviário global e alguns usos industriais. Biogás, a partir de digestão anaeróbia de resíduos agrícolas e de tratamento municipal de resíduos sólidos urbanos (RSU), pode ser usado para gerar eletricidade, calor ou ambos. Biomassa sólida, como briquetes e pellets, respondem por 80% da geração de calor e 75% da eletricidade total a partir de biomassa.

Mesmo hoje, a contribuição da bioenergia tradicional no consumo final é maior do que a bioenergia moderna. Por sinal, o uso desta para aquecimento em residências, escritórios e indústrias é maior do que no setor de transportes e geração elétrica. Por outro lado, a biomassa tradicional é utilizada exclusivamente para aquecimento de edificações e cocção. A biomassa sólida representa a maior participação na geração de calor e eletricidade, ao passo que os biocombustíveis líquidos representam a maior fonte energética no setor de transportes.

Existe muita incerteza quanto ao potencial global da bioenergia. Além das circunstâncias políticas e de mercado, há forte dependência do aumento de produtividade no sector agrícola para alimentação, forragem e produção de fibras e produtos florestais. O crescimento na oferta de bioenergia depende de um conjunto amplo de fatores, desde o uso de terras degradadas, foco em resíduos agroflorestais, aumento de produtividade na agricultura e silvicultura etc.

Biocombustíveis Sólidos

Conforme mencionado, os combustíveis sólidos respondem pela maior parte da geração de bioeletricidade. OS EUA e Canadá são os maiores exportadores mundiais de biomassa densificada, tendo a Europa como principal destino. Para viabilizar comercialmente o transporte de longa distância de resíduos da biomassa vegetal como fonte de energia, devem-se minimizar

os inconvenientes e as limitações que a biomassa não tratada apresenta, tais como: baixa densidade, transporte oneroso, heterogeneidade, umidade variável e baixo poder calorífico.

A peletização surgiu como uma solução tecnológica para melhorar as propriedades da biomassa como combustível, diminuindo significativamente o custo para o empacotamento, transporte e o armazenamento, ao diminuir o volume de biomassa (através da prensagem), concentrando o poder energético do produto. A compactação das estruturas internas do material deixa o combustível muito mais uniforme comparado à biomassa inicial. A utilização da biomassa densificada no formato de “pellets” contribuiu significativamente para o progresso recente na combustão da madeira. Eles podem ter várias formas, sendo mais comum o formato cilíndrico, com diâmetro entre 6,0 e 10,0 mm e comprimento entre 20,0 e 50,0 mm. A umidade inicial da biomassa pode chegar a 70 ou 80% Base Úmida e deve ser reduzida para uma faixa entre 6,0 e 10,0 % para que a pressão ative a lignina, cumprindo sua função ligante. Na média, o PCI atinge 4.600 kcal/kg (19,2 MJ/kg). Pellets de biomassas mais resinosas podem alcançar poder calorífico maior. O Pinus, por exemplo, tem poder calorífico maior do que o eucalipto.

Qualquer biomassa disponível pode ser peletizada, mas as mais utilizadas são: i) resíduos de indústria (serrarias, laminadoras, etc.); ii) madeira de reflorestamento ou nativa (pouco utilizada); iii) palhada ou bagaço de cana de açúcar.

2.5.5.1 - Biocombustíveis Líquidos

O etanol e o biodiesel são os principais biocombustíveis líquidos produzidos no mundo, respondendo por mais de 90% do total. Os Estados Unidos e Brasil são, respectivamente, 1º e 2º maiores produtores e consumidores dos dois referidos combustíveis, respondendo por 70% da produção global.

O etanol é uma substância química com fórmula molecular C_2H_6O , produzida especialmente via fermentação de açúcares. É um biocombustível utilizado em motores de combustão interna com ignição por centelha (Ciclo Otto) em substituição especialmente à gasolina e em contraponto a outros combustíveis fósseis.

O Brasil é pioneiro na utilização em larga escala de etanol combustível desde meados da década de 1970, com o Programa Proálcool. São duas as formas de utilização do produto: na forma de etanol anidro, como componente de mistura na formação da gasolina C; ou como etanol hidratado, comercializado em todo o país como um combustível acabado.

A Figura 2.33 sintetiza as rotas tecnológicas para produção de bioetanol, considerando as diferentes matérias-primas de interesse. Observe-se que a produção de bioetanol utilizando celulose ainda está em nível de laboratório e plantas-piloto, ainda sem significado real no contexto energético, com obstáculos tecnológicos e econômicos por superar.

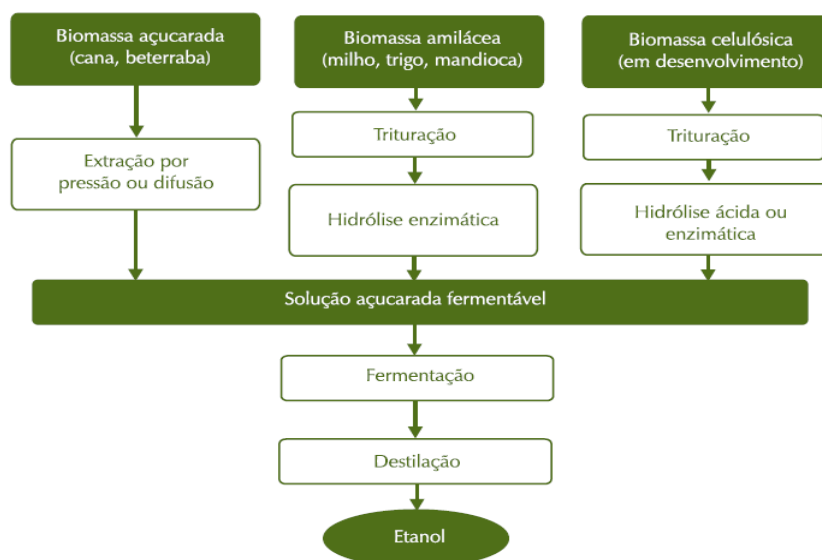


Fig. 2.33 – Rotas Tecnológicas de Produção de Etanol

A tabela 4.4 compara as principais características físico-químicas do etanol versus a gasolina. Vale observar que essas propriedades não se referem a uma especificação formal, que inclui diversas outras propriedades e parâmetros associados a segurança, ao desempenho, a contaminação e a agressividade química. No capítulo 4, será discutido o rol de modificações implantados nos carros conforme o teor de etanol da gasolina. Dois pontos importantes: o etanol possui 70% do PCI da gasolina, mas possui uma octanagem²⁶ mais elevada.

Tabela 2.7 – Propriedades da Gasolina e do Etanol

Parâmetro	Unidade	Gasolina	Etanol
Poder calorífico inferior	kJ/kg	43.500	28.225
	kJ/litro	32.180	22.350
Densidade	kg/litro	0,72 – 0,78	0,792
Octanagem RON (<i>Research Octane Number</i>)	–	90 – 100	102 – 130
Octanagem MON (<i>Motor Octane Number</i>)	–	80 – 92	89 – 96
Calor latente de vaporização	kJ/kg	330 – 400	842 – 930
Relação ar/combustível estequiométrica		14,5	9,0
Pressão de vapor	kPa	40 – 65	15 – 17
Temperatura de ignição	grau C	220	420
Solubilidade em água	% em volume	~ 0	100

²⁶ **Octanagem** ou **índice de octano**, é o índice de resistência à detonação de combustíveis usados em motores no ciclo de Otto (como gasolina, álcool e GNV). A octanagem não tem correspondência com a qualidade do combustível. Porém, motores mais potentes exigem maiores compressões e, por consequência, combustíveis mais resistentes à ignição espontânea. Potência e rendimento ótimos são sempre obtidos a partir de combustíveis de octanagem compatível com o projeto do motor.

Fonte: Nogueira – Bioetanol de Cana-de-Açúcar: Energia para o Desenvolvimento Sustentável (2008)

O motor diesel foi inventado no final do século XIX por Rudolph Diesel (1858-1913), desenvolvido para funcionar com óleo mineral (petróleo). Entretanto, o próprio inventor reconheceu que óleos vegetais poderiam ser empregados.

Os principais componentes de óleos vegetais e gorduras animais são os triacilgliceróis, mais conhecidos como triglicerídeos. Quimicamente, eles são formados por três ácidos graxos conectados com um álcool, glicerol, também conhecido como glicerina, conforme ilustrado pela figura 2.34. Tipicamente, triglicerídeos de óleos e gorduras contêm diversos tipos de ácidos graxos, de forma que cada óleo e gordura têm um perfil ou composição distinta, em termos de combinação dos citados ácidos graxos.

Problemas advindos da viscosidade excessiva dos óleos vegetais levaram pesquisadores a tentar reduzi-la, de forma que não fosse necessária a adaptação dos motores. A figura 4.26 mostra o que vem a ser o processo de transesterificação para a produção do “biodiesel”: um triglicerídeo reage com três moléculas de álcool (em geral utiliza-se o metanol ou etanol) e, na presença de um catalisador (acelerador de uma reação química), transforma-se em três moléculas de álcool ésteres (ésteres metílicos ou etílicos, caso metanol ou etanol, respectivamente, seja utilizado na reação) e uma molécula de glicerol. Os termos R1, R2 e R3 referem-se aos radicais dos ácidos graxos do triglicerídeo.

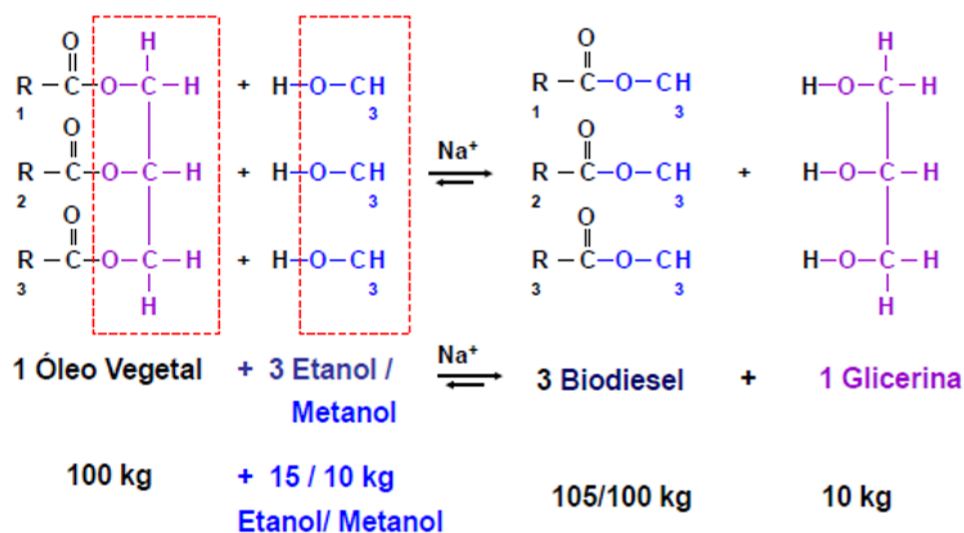


Figura 2.34 – Reação da transesterificação

As moléculas do biodiesel (ésteres alquílicos) possuem similaridades c/ as do diesel mineral, mas apresentam, entretanto, algumas diferenças importantes, com implicações no seu comportamento e desempenho. A figura 2.8 indica algumas das diferenças fundamentais dos dois, o que impede o biodiesel de ser um substituto completo do diesel mineral.

Tabela 2.8 – Diferenças Físico-químicas entre o Diesel Mineral e o Biodiesel

Diesel	Biodiesel
30/35% H-C aromáticos	100% ésteres alquílicos
65/70% parafínicos	Cadeias C14- C22 (+longas)
Cadeias C10-C16 (+ curtas)	Duplas ligações
Livre de oxigênio	11% de oxigênio
Presença de S	Ausência de S
Maior estabilidade	Maior poder de solvência
Menor lubrificidade	Maior higroscopicidade

Existe farta literatura que indica que a mistura de 20% de biodiesel e 80% diesel mineral (B20) como sendo uma combinação já testada com sucesso para motores diesel. Poucos problemas de compatibilidade de materiais surgem com B20. Misturas mais ricas em biodiesel causam mais problemas com peças de borracha. Logo, B20 é basicamente, um compromisso entre custo, emissões, clima frio e compatibilidade de materiais. Este entendimento é compartilhado por diversas empresas fabricantes de motores diesel.

Por outro lado, a partir da década de 90 houve vários estudos, em particular, na Alemanha, com biodiesel puro (B100). Eles dão amplas evidências de que o uso continuado de B100 em motores automotivos, projetados para o uso de diesel, causa corrosão em materiais como cobre, zinco, latão, chumbo, borrachas (natural e nitrílica) etc. Além disso, apresenta incrustações nos cilindros, devido à combustão incompleta, fruto da maior viscosidade e ponto de fulgor (temperatura de ignição) do biodiesel comparado ao diesel mineral.

2.5.5.2 - Biogás e Biometano

O Biogás é um biocombustível gasoso produzido a partir da decomposição da matéria orgânica (usualmente, resíduos) por ação de bactérias, através de um processo denominado biodigestão anaeróbica. Digestão anaeróbica (DA) pode ser definida como a conversão de material orgânico em dióxido de carbono, metano e lodo através de bactérias, em um ambiente pobre em oxigênio. Este processo é uma das formas mais antigas de digestão e ocorre naturalmente na ausência de oxigênio, como em plantações de arroz, águas paradas, estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários. O gás obtido durante a digestão anaeróbica, chamado de biogás, inclui além do metano e do dióxido de carbono, alguns gases inertes e compostos sulfurosos. A composição típica do biogás é dada na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Composição Típica do Biogás

	Conteúdo (% em volume)
<i>Metano</i>	50% - 70%
<i>Dióxido de Carbono</i>	25% - 45%
<i>Vapores d'água</i>	2% (20°C) - 7% (40°C)
<i>Oxigênio</i>	<2%
<i>Nitrogênio</i>	<2%
<i>Amônia</i>	<1%
<i>Hidrogênio</i>	<1%
<i>Ácido Sulfídrico</i>	<1%

Fonte: EPE - NT DEA 18: Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos (2014)

A composição do biogás é altamente sensível a composição das matérias prima, e das condições em que ocorre o processo da biodigestão anaeróbica.

O processo de biodigestão anaeróbica pode ser dividido em quatro fases, conforme ilustrado na figura 2.35: hidrólise, que é a primeira fase do processo onde a matéria orgânica complexa (polímeros) é quebrada em partes menores e mais simples; acidogênese, onde os produtos da hidrólise são convertidos em substratos para metanogênese; acetogênese, que também converte os produtos da acidogênese que não sofrem metanogênese diretamente; e por último, a metanogênese é a produção de metano dos substratos por bactérias anaeróbicas.

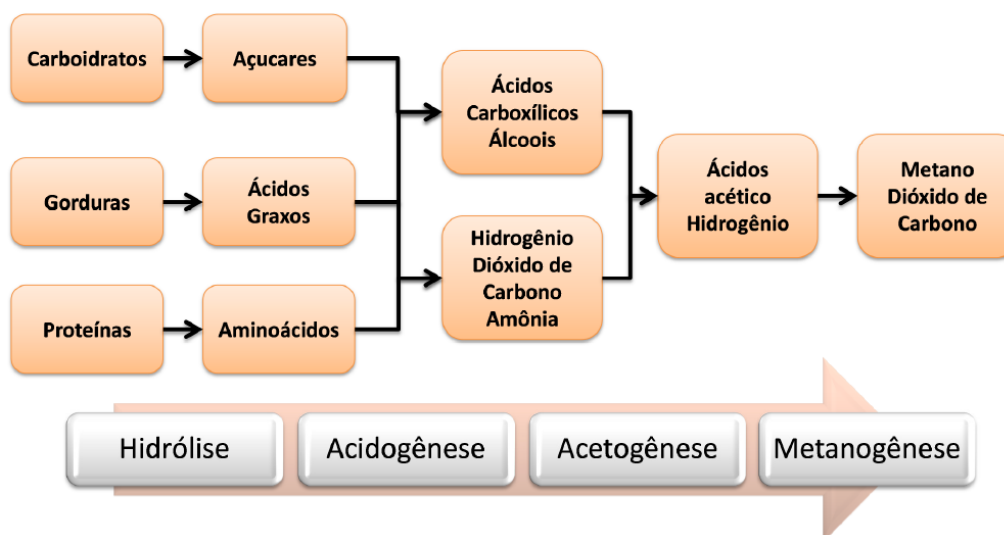


Figura 2.35 - Fluxograma do Processo de Biodigestão Anaeróbica

A metanogênese é a fase mais crítica e mais lenta da biodigestão, é extremamente influenciada pelas condições de operação, como temperatura, composição do substrato, taxa de alimentação, tempo de retenção, PH, concentração de amônia entre outros,

Já o processo industrial de produção de biogás é dividido também em quatro fases: pré-tratamento, para adequação da biomassa; digestão do resíduo, produção bioquímica do biogás; recuperação de gás, processo de recuperação, tratamento e armazenamento do biogás e; tratamento de resíduos, disposição do lodo da digestão.

O biometano é obtido após a purificação do biogás, reunindo as propriedades físico-químicas necessárias para ser intercambiável com o gás natural em todas as suas aplicações. Com isso, pode ser comercializado por meio da rede de distribuição de gás canalizado ou como gás comprimido (ANP, 2015).

O biogás e o biometano apresentam um elevado potencial energético (como combustível e na geração de eletricidade), servindo para a redução tanto dos GEE, quanto da poluição hídrica. Os resíduos utilizados na produção de ambos são oriundos de diversas fontes, sendo os principais setores: agrícola, de alimentos e de saneamento. Dado que em geral, sua produção é descentralizada, torna-se imprescindível uma maior integração entre os agentes públicos e privados, a fim de criar um arcabouço logístico e legal que possibilite aprimorar as redes de distribuição e, conseqüentemente, a sua comercialização.

No entanto, é necessário que haja uma legislação específica para este combustível renovável, com a definição de parâmetros para o seu uso, de forma a permitir a sua disponibilidade ao consumidor. A regulação atualmente existente no Brasil é exclusiva para o biometano, quando proveniente de resíduos orgânicos. Para aquele oriundo de esgoto sanitário e gás de aterro, somente é permitido seu uso para fins experimentais, devido à presença de substâncias, como o siloxano, composto a base de silício presente em condicionadores de cabelo etc. e corrosivo para as paredes dos dutos de GN.

2.5.5.3 - Biocombustíveis de 2ª Geração

Para minimizar o conflito no uso da terra advindo do uso de cultivos energéticos, surgiu o conceito de biocombustíveis de 2ª geração, oriundos de matérias-primas não utilizadas na alimentação, p. ex., resíduos urbanos e de cultivos agrosilopastoris. Entre eles, destacam-se:

- Etanol de segunda geração (etanol 2G ou lignocelulósico): É obtido normalmente a partir de material celulósico, oriundo do processamento de qualquer biomassa de origem vegetal, como resíduos de milho, casca de arroz, etc. No Brasil, a pesquisa para obtenção do etanol 2G se concentra predominantemente nos resíduos da produção sucroalcooleira (bagaço, palha e ponta).
- Diesel avançado: Refere-se a todo biocombustível que possa ser usado em motores do ciclo diesel. Possuem composição química análoga à do óleo diesel de origem fóssil e são obtidos através de reações de hidrogenação de óleos vegetais, dando origem ao Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO); através da fermentação por microorganismos

geneticamente modificados (por exemplo, o diesel de cana); ou pelo processo de transformação de biomassa para líquidos (BTL), principalmente via Fischer-Tropsch.

- Bioquerosene de aviação (BioQAV): substância derivada de biomassa renovável que pode ser usada em turborreatores e turbopropulsores aeronáuticos ou, conforme regulamento, em outro tipo de aplicação que possa substituir parcial ou totalmente combustível de origem fóssil (BRASIL, 2011). É similar ao querosene de aviação, que pode ser obtido por hidrogenação, Fischer-Tropsch, ou fermentação.

Do ponto de vista ambiental, os novos biocombustíveis contribuem para uma diminuição mais intensa das emissões dos gases de efeito estufa (GEE). Sua produção leva a um maior aproveitamento da biomassa, uma vez que os rejeitos de processo são transformados em recursos energéticos.

2.5.6 - Energia Geotérmica

Recursos geotérmicos consistem de energia térmica a partir do interior da Terra armazenado em ambos rocha e vapor preso ou água líquida, e são usados para gerar energia elétrica em uma usina de energia térmica ou em outras aplicações domésticas e agro-industriais que necessitam de calor, bem como em aplicações de cogeração. A mudança climática não tem impactos significativos sobre a eficácia da energia geotérmica.

A energia geotérmica é um recurso renovável como o calor aproveitado a partir de um reservatório ativo é continuamente restaurado pela produção de calor natural, condução e convecção a partir circundante regiões mais quentes, e os fluidos geotérmicos são reabastecidos extraídos por recarga natural e pela reinjeção dos fluidos de refrigeração.

A energia geotérmica é hoje extraída usando poços e outros meios que produzem fluidos quentes a partir de: (a) reservatórios hidrotermais com naturalmente alta permeabilidade, ou (b) sistemas geotérmicos de engenharia avançada (EGS), com percursos de fluido artificiais. Tecnologia para a geração de eletricidade a partir de reservatórios hidrotermais é maduro e confiável, e existe há cerca de 100 anos. Tecnologias para o aquecimento direto usando bombas de calor para aquecimento e para outras aplicações também são maduras.

A energia geotérmica superficial (< 400m) fornece calor ou água quente, ao passo que a energia geotérmica profunda (> 400m) gera eletricidade e calor. Energia elétrica a partir da energia geotérmica é especialmente adequada para o fornecimento de energia de base, mas também pode ser despachada e usada para atender a demanda de pico. Ou seja, ela pode complementar a geração de eletricidade variável, tal como UTEs convencionais.

Em 2023, havia uma capacidade instalada global de 13,5 GW de usinas geotermelétricas. São poucos os países com recursos geotérmicos. Não é o caso do Brasil.

2.5.7 - Energia oceânica

A energia oceânica se refere a qualquer energia aproveitada do oceano por meio de ondas do mar, amplitude das marés (subida e descida), correntes de marés, correntes oceânicas (permanentes), gradientes de temperatura e gradientes de salinidade.

A energia oceânica oferece o potencial para redução de emissões de carbono a longo prazo, mas é pouco provável que faça uma contribuição significativa no curto prazo, devido à sua fase nascente de desenvolvimento. O potencial teórico de 7.400 EJ / ano contida nos oceanos do mundo supera facilmente os atuais requisitos de energia humanos. As políticas governamentais estão contribuindo para acelerar a implementação de tecnologias de energia do oceano, aumentando a expectativa de que rápido progresso é possível. Há sinais encorajadores de que o custo de investimento de tecnologias de energia do oceano e o custo nivelado de eletricidade gerada vai diminuir em relação aos níveis não competitivos presentes nos projetos de P&D e demonstração. Se estas reduções de custos são suficientes para permitir a implantação em larga escala de energia dos oceanos é a incerteza mais crítica na avaliação do futuro papel deste recurso na mitigação das alterações climáticas. As principais rotas tecnológicas para aproveitamento deste recurso são:

- Energia das ondas – derivada da energia cinética dos ventos sobre a superfície do oceano;
- Energia dos mares – derivada das forças gravitacionais do Sistema Terra-Lua;
- Energia das Correntes Oceânicas – derivada dos ventos e circulação termoalina;
- Energia térmica dos oceanos – explora as diferenças de temperatura dos oceanos (superfície e abaixo de 1000m);
- Gradiente Salino – derivada da diferença de salinidade entre água fresca e dos mares na foz dos rios.

No final de 2016, a capacidade mundial de energia dos oceanos manteve-se em 536 MW, com a maior parte deste vindo sob a categoria de energia das marés, e barragens especificamente maré em todas baías e estuários. A maior parte do esforço de desenvolvimento em tecnologias de potência oceano está focada na maré, corrente e ondas de energia em águas abertas.

As tecnologias de energia oceânica representam a menor parcela do mercado de energia renovável, embora o recurso global seja vasto. Com desenvolvimento tecnológico contínuo, apoio político dedicado e investimento crescente, a energia oceânica tem gradualmente se movido em direção à implantação em escala comercial. Um total de 2 MW de capacidade de energia oceânica foi instalado em 2023, quase o mesmo que em 2022. 1 A capacidade operacional instalada estimada em 2023 foi de 513 MW.

Itemização proposta para os capítulos seguintes:

Capítulo 3 - Nexa Água – Energia – Solos na produção de Alimentos e o Papel do Brasil

3.1 – O desafio de alimentar 10 bilhões de pessoas

3.2 – O crescente protagonismo do Brasil na produção de alimentos

3.3 – A matriz energética brasileira

3.4 – Tecnologias de Gestão de água

3.5 – Sistemas agrivoltaicos e aquivoltaicos

Capítulo 4 - Convergência Tecnológica e a ruptura do setor elétrico e de transportes

4.1 – Lei de Moore e convergência tecnológica

4.2 – Solar FV, eólica e baterias e ruptura do setor elétrico

4.3 – Carros elétricos autônomos e ruptura do setor de transportes

4.3.1. – Veículos elétricos vs. Veículos a combustão interna

4.3.2 – Tecnologia 5G e veículos elétricos autônomos

4.3.3 - Redesenho dos centros urbanos com veículos autônomos

Capítulo 5 - Princípios de IoT, computação física e comunicação via RF

5.1 – Cidades inteligentes e Princípios de IoT

5.1.1 – Recursos energéticos distribuídos e Usinas elétricas virtuais (VPP)

5.1.2 – Medidores inteligentes, rede elétrica inteligente e cidades inteligentes

5.2 – Computação física e sistemas DIY

5.2.1 – Princípios de sensoriamento e tipos de sensores

5.2.2 – Atuadores, controladores e kits de desenvolvimento de sistemas DIY

5.3 – Princípios de comunicação via radiofrequência

Capítulo 6 – Tecnologias Ambientais para Resiliência às Mudanças Climáticas

6.1 - Tecnologias ambientais para as cidades (microgeração elétrica, veículos elétricos autônomos, alerta climático em smartphone, plantio árvores, uso de tintas reflexivas, técnicas eficientes de refrigeração, arquitetura bioclimática)

6.2 - Tecnologias ambientais para o campo

6.2.1 - Tecnologias ancestrais (terraços para coleta e armazenamento de água, compostagem, arquitetura bioclimática, uso de madeira e biomassa local, uso de material reciclado, PANCs, perenes, biocarvão, leguminosas, frutíferas, cultivos chave)

6.2.2 - Tecnologias modernas de baixo carbono (sistemas agrivoltaicos ILPF, plantio direto, FBN, agrofloresta, tratamento de madeira e bambu para construção, rotação de gado, biotecnologia para aumento de produtividade e resistência a seca, produção integrada alimentos (Embrapa).

6.2.3 - Tecnologias digitais de sensoriamento (microgeração elétrica, comunicação via redes LoRa e LoRaWAN, gestão inteligente dos recursos hídricos (sensores de nível de reservatórios, sensores de qualidade de água, sensores de parâmetros do solo, sensores de parâmetros atmosféricos, controladores de registros hidráulicos e alimentação elétrica de bombas etc.)

Estudo de Caso: Laboratório Experimental Araras de Tecnologias Ambientais