

Coleção Química no Cotidiano

Sustentabilidade e Soberania
Volume 15



Paulo Anselmo Ziani Suarez
Simoni Margareti Plentz Meneghetti

A energia química *em movimento*

Coleção Química no Cotidiano

Volume 15

A energia química em movimento

Paulo Anselmo Ziani Suarez

Simoni Margareti Plentz Meneghetti



MOVIMENTO
QUÍMICA
PÓS 2022
Sustentabilidade e Soberania


Sociedade
Brasileira
de Química



CERSusChem
Centro de Excelência para
Pesquisa em Química Sustentável

1ª Edição

São Paulo | Sociedade Brasileira de Química | 2022

© Sociedade Brasileira de Química

**Coleção Química no Cotidiano - Sustentabilidade e Soberania
Volume 15**

Coordenadoras do projeto

Claudia Moraes de Rezende e Rossimiriam Pereira de Freitas

Editora-chefe

Claudia Moraes de Rezende

Revisores

Claudia Moraes de Rezende e Rossimiriam Pereira de Freitas

Arte gráfica e editoração

Cabeça de Papel Projetos e Design LTDA (www.cabecadepapel.com)

Ficha Catalográfica
Wanda Coelho e Silva (CRB/7 46)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

S54q Suarez, Paulo Anselmo Z.

A energia química em movimento / Paulo Anselmo Ziani Suarez, Simoni Margareti Plentz Meneghetti – São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2022.
p.68 - (Coleção Química no Cotidiano, v. 15)

ISBN 978-85-64099-31-9

1. Química. 2. Energia. I. Suarez, Paulo Anselmo Z.. II. Título. III. Série.

CDD 547.7

CDU 547.9

Todos os direitos reservados – É proibida a reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por outro meio.
A violação dos direitos de autor (Lei nº 5.988/73) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todas as instituições, públicas e privadas, que financiam há mais de 20 anos as pesquisas que realizam na área de energia, em especial à CAPES, FAPEAL, FAPDF, CNPq, FINEP e INCT Catálise pelo apoio. Gostariam, também, de salientar a importante contribuição do CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa e taxas de bancada, as quais são importantes para viabilizar a cooperação que os dois grupos de pesquisa mantêm.

Índice

1- Introdução: a combustão, a queima de biomassa e a evolução do homem.....	5
2- Início do uso dos combustíveis fósseis e a revolução industrial: o pistão e a máquina a vapor	10
3- Motores a combustão interna e desenvolvimento dos combustíveis líquidos ...	15
4- A máquina a vapor e uma outra e infeliz revolução: o início da era fóssil	19
5- Ambiente, sociedade e controle de produção: a transição dos combustíveis fósseis para soluções renováveis.....	24
6- O uso da biomassa tradicional e os seus produtos de pirólise e gaseificação..	29
6- A produção de biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: biodiesel, diesel renovável e bioquerosene de aviação.....	33
7- O bioetanol tradicional (1G) e o de segunda geração (2G)	38
8- As turbinas eólicas e o desenvolvimento de materiais	43
9- A energia do Sol	48
10- As baterias e o armazenamento de eletricidade	52
11- Nem tudo que reluz é ouro: análise do ciclo de vida	57
12- Para onde vamos: a química e a futura matriz energética mundial	61
Bibliografia	66

1- Introdução: a combustão, a queima de biomassa e a evolução do homem

A queima de troncos, palhas e folhas é apontada por muitos cientistas como a principal responsável pela evolução do homem. Não se sabe ao certo quando os hominídeos começaram a dominar ou simplesmente a usar o fogo, e as estimativas variam de 200 mil a 2 milhões de anos atrás. Porém, é consenso que a energia liberada na queima dessas e de outras biomassas trouxe inúmeras vantagens aos nossos antepassados. Por exemplo, cozinhar os alimentos facilita muito a sua digestão, aumentando o aproveitamento de seus nutrientes e diminuindo a quantidade necessária de comida para a sobrevivência. O calor das fogueiras também ajudou o homem a permanecer aquecido em climas frios, a ter iluminação e a afastar inimigos naturais.

Mas, afinal, o que é essa queima, como a que ocorre na lareira da **Figura 1a**, que tanto ajudou na nossa evolução? Também chamada de combustão, essa reação química consiste na oxidação de matéria orgânica na presença de oxigênio, conforme ilustrado na Figura 1b. Por exemplo, a combustão completa da glicose, com fórmula mínima $C_6H_{12}O_6$, libera calor e forma dióxido de carbono e água, conforme equação (1) da **Figura 1b**. Caso não haja oxigênio

amplamente disponível, a reação irá acontecer de forma incompleta, produzindo também monóxido de carbono e carvão, como ilustrado nas equações (2), (3) e (4) da **Figura 1b**. Caso não haja hidrogênio na matéria orgânica, como é o caso do carvão, será formado apenas monóxido ou dióxido de carbono, como na equação (5) da **Figura 1b**. Ou seja, para que ocorra a combustão, é necessária a presença de um combustível, como a glicose ou o carvão, e o comburente, que é o oxigênio.

A biomassa, como a lenha que queima na lareira da Figura 1a, é constituída essencialmente por matéria orgânica, principalmente macromoléculas, das quais podemos destacar os polissacarídeos e a lignina. Além disso, a biomassa contém componentes inorgânicos, como água e sais minerais derivados de sódio, silício, potássio e magnésio, dentre outros. Os polissacarídeos são macromoléculas lineares, ramificadas ou não, de alta massa molar, obtidas a partir da condensação de açúcares, como a glicose, a xilose, a maltose e a sacarose. Os principais polissacarídeos que formam os tecidos vegetais são a celulose, a hemicelulose e o amido. A celulose, que é a macromolécula mais abundante na natureza, é um polímero linear, não ramificado, obtido pela condensação da sacarose, como mostrado na Figura 1c. Diferente dos polissacarídeos, a lignina é uma macromolécula extremamente complexa. Imagine diversas cadeias dispostas em todas as direções, que estão conectadas por ligações químicas para formar uma única macromolécula tridimensional. Esse

arranjo tridimensional de moléculas complexas, como a lignina, é chamado de retículo. É possível identificar fragmentos de três compostos principais na lignina, os álcoois *trans*-sinapílico, *trans*-coniferílico e *trans-para*-cumárico, ilustrados na **Figura 1d**. Como é possível verificar, o álcool *trans-para*-cumárico, o mais simples entre eles, possui um anel benzênico ao qual está ligado um grupo fenol (hidroxila ligada diretamente a um anel aromático) e uma cadeia alifática e linear de três carbonos, na qual há a presença de uma dupla ligação (olefina) e um grupo álcool (hidroxila ligada diretamente a um carbono alifático). Já os álcoois *trans*-coniferílico e *trans*-sinapílico, além de apresentarem a estrutura do álcool *trans-para*-cumárico, possuem o grupo metóxi ligado ao anel benzênico (um grupo metóxi no caso do álcool *trans*-coniferílico e dois no álcool *trans*-sinapílico). Esses três álcoois se ligam a partir de reações entre a ligação dupla de uma molécula e o grupo hidroxila de outra, como ilustrado na Figura 1d, fazendo com que a molécula da lignina cresça em todas as direções. Durante a queima de biomassa, toda matéria orgânica é convertida em óxidos de carbono e água. Já a parte inorgânica dá origem a óxidos durante a queima, os quais permanecem sólidos, formando o que chamamos de cinzas. Parte da cinza é arrastada pelos gases gerados na combustão (dióxido e monóxido de carbono) e pela água em fase de vapor, formando, então, a fumaça.

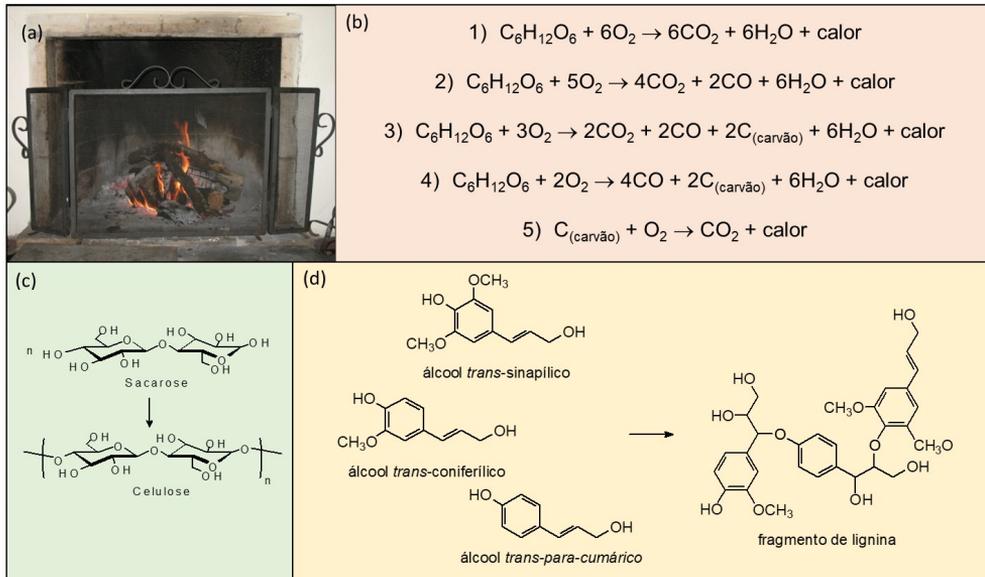


Figura 1. Constituição da biomassa e exemplos de reações envolvidas na sua combustão: (a) fogo de lenha em uma lareira; (b) queima de glicose e de carvão por combustão completa (1 e 5) e incompleta (2 a 4); (c) formação da celulose a partir da sacarose; e (d) formação de um fragmento de lignina a partir da formação de ligações entre os álcoois *trans*-sinapílico, *trans*-coniferílico e *trans-para*-cumárico.

Com o passar do tempo, o homem começa a desenvolver diversos processos para obtenção de materiais, como a transformação de argila em cerâmica, areia em vidro e minérios em metais. Em todos eles, a energia usada para promover as reações químicas, ou mudanças físicas, era proveniente da queima da biomassa. Assim, além de aquecimento, iluminação e preparo de alimentos, os processos iniciais de industrialização tornaram o homem completamente dependente da queima de biomassa como

única fonte de energia. De fato, exceptuando o desenvolvimento de tecnologias incipientes de aproveitamento da energia dos ventos e dos rios, que serão discutidas posteriormente, a queima da biomassa dominou por milênios a matriz energética usada pelas sociedades antigas. Essa história começou a mudar há pouco mais de 200 anos, quando o ser humano iniciou a substituição da biomassa por fontes capazes de gerar maior quantidade de energia, dando início ao uso dos controversos combustíveis fósseis.

2- Início do uso dos combustíveis fósseis e a revolução industrial: o pistão e a máquina a vapor

No final do século XVIII, a energia da queima de matéria orgânica, uma vez mais, traz uma profunda mudança na nossa sociedade com a invenção da máquina a vapor. Em 1769, o inglês James Watt (1736-1819) conseguiu inventar uma máquina bastante eficiente que não necessitava de força animal ou humana para gerar movimento, revolucionando a atividade industrial e os meios de transporte de cargas e passageiros. De fato, o uso da máquina a vapor desenvolvida por Watt possibilitou a criação de diversos sistemas que automatizaram a mineração, a indústria e os transportes, transformando completamente a sociedade.

Mas como funciona esta máquina? Para entender melhor a concepção de Watt, um esquema simplificado do funcionamento de uma máquina a vapor é apresentado na **Figura 2a**. O calor liberado ao queimar um combustível, que pode ser lenha ou carvão, aquece uma caldeira fechada que lembra muito uma panela de pressão. A água contida na caldeira absorve o calor da queima e passa para a fase de vapor. O vapor gerado é então acumulado no interior da

caldeira, aumentando a pressão interna até que um cilindro, chamado de pistão, seja empurrado. Esse processo é igual ao que podemos observar na panela de pressão, em que a pressão do vapor consegue elevar uma válvula metálica. Enquanto o vapor de água empurra o pistão, este, por sua vez, move uma roda que está conectada a ele por um eixo. Quando o pistão alcança uma válvula de saída, o vapor é liberado, diminuindo a pressão interna, o que faz o cilindro retomar a sua posição inicial. Nesse momento, um novo ciclo de pressurização e movimento do pistão se inicia, obtendo-se um giro contínuo da roda. Assim, uma máquina a vapor normalmente tem dois gases sendo emitidos, um usualmente branco, constituído essencialmente por vapor de água que sai do pistão, e outro de cor escura, contendo os compostos resultantes da combustão, usualmente monóxido e dióxido de carbono, fuligem (partículas de carvão não queimado), assim como vapor de água.

Na máquina a vapor, temos, então, um processo de transformação física e outro baseado em uma reação química, conforme ilustrado na **Figura 2b**. O processo físico envolve a mudança da água em estado líquido na temperatura ambiente para um estado de vapor superaquecido, o que é necessário para que a pressão aumente até que se consiga movimentar o pistão. Podemos dividir este processo em três etapas. Inicialmente, a água é aquecida da temperatura ambiente até a temperatura de ebulição que é de 100 °C quando a pressão é de 1 atm, porém superior a essa

temperatura em um sistema pressurizado, como é o caso da caldeira da máquina a vapor (representado por q_1 na **Figura 2b**). Quando a temperatura de evaporação é atingida, a água absorve energia para passar ao estado de vapor (representado por q_2 na **Figura 2b**). Note que à medida que a pressão vai aumentando para conseguir movimentar o pistão, a temperatura de evaporação também aumenta. Por último, temos o aquecimento do vapor que ocorre com o aumento da pressão (representado por q_3 na **Figura 2b**). O calor, ou energia, total necessário é igual à soma dos calores envolvidos nas três etapas ($q_1+q_2+q_3$), e ele é fornecido pelo calor gerado na combustão do carvão, que é um processo de transformação química. Neste caso, ocorre a combustão completa e incompleta do carvão, resultando em carvão particulado (fuligem), monóxido e dióxido de carbono. No entanto, deve-se salientar que nem todo o calor liberado na reação química de queima do carvão é usado para gerar o vapor superaquecido, pois parte se perde para o aquecimento das paredes da máquina a vapor, que acabam aquecendo também o ar ao redor, e outra parte é perdida nas emissões, pois a mistura emitida sai da caldeira a uma temperatura muito elevada.

Na **Figura 2c**, é mostrado o “Trem do Fim do Mundo”, em Ushuaia, Argentina, que ainda funciona movido por uma máquina a vapor em um circuito turístico dentro do parque Nacional da Terra do Fogo. No caso dos trens a vapor, o pistão movimenta as rodas que estão sobre trilhos, e tal engenho conseguiu mudar completamente o

sistema mundial de transporte de cargas e de passageiros no início do século XIX. Muitos outros exemplos poderiam ser mostrados aqui, desde processos de fabricação de tecidos até cunhagem de moedas, antes feitos de forma manual e que passaram a ser mecanizados, dando início à moderna indústria automatizada.

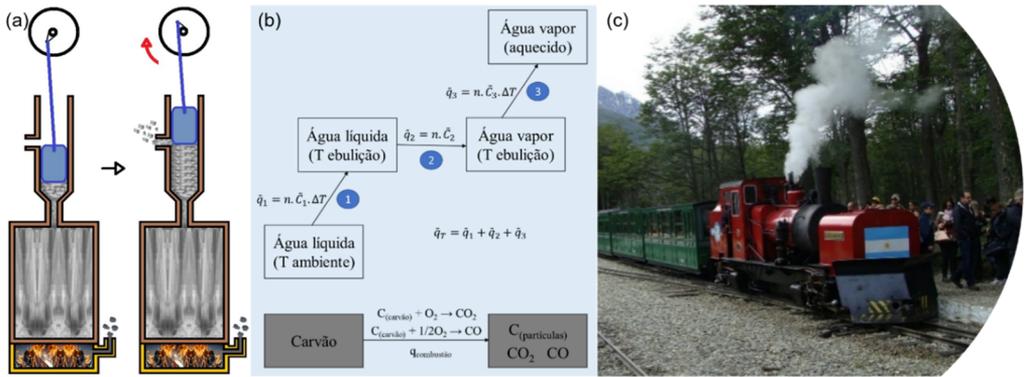


Figura 2. (a) Esquema de uma máquina a vapor em que a pressão de vapor movimenta um pistão; (b) processo físico de geração de vapor superaquecido e a reação de combustão de carvão dentro da máquina a vapor, no qual \bar{q} são os calores envolvidos por mol em cada processo, n é o número de mols e \bar{C} é a capacidade calorífica da água no estado envolvido nos processos 1 e 3 ou o poder específico de evaporação da água (processo 3); e (c) Trem do Fim do Mundo, em Ushuaia, Argentina, que ainda funciona movido por uma máquina a vapor.

Como mencionado anteriormente, pode-se queimar qualquer matéria orgânica para movimentar uma máquina a vapor. No entanto, a biomassa foi abandonada e o carvão mineral foi o combustível escolhido, mesmo não sendo disponível em qualquer região. Essa

escolha foi feita em função da densidade de energia do carvão mineral, bem superior à da biomassa. A cada grama de carvão mineral queimada são obtidas entre 7 e 8,6 calorias, dependendo da sua qualidade, enquanto a mesma quantidade de madeira fornece aproximadamente 3,5 calorias, quando úmida, ou 4,5 calorias se estiver seca. Em outras palavras, para se obter uma determinada quantidade de vapor, a massa de carvão necessária seria a metade da de madeira requerida.

3- Motores a combustão interna e desenvolvimento dos combustíveis líquidos

É inegável a contribuição da máquina a vapor para o aproveitamento da energia da combustão a fim de gerar movimento. No entanto, a máquina a vapor apresentava muitas desvantagens, sendo a principal a sua enorme perda de energia na forma de calor para o ambiente, como já mencionado. Essa baixa eficiência é explicada pelo fato de que a reação de combustão ocorria em um local e a geração de vapor, em outro, o que acaba dissipando muita energia na forma de calor pelas paredes da máquina, nos gases de exaustão da fornalha e no vapor de água. Diversas tentativas de melhora na eficiência foram feitas, como condensar e reciclar a água ao invés de liberar o vapor. No entanto, no final do século XIX, muitos pesquisadores se dedicaram a desenvolver um sistema no qual a combustão é feita no próprio pistão, os chamados motores de combustão interna ou de explosão interna. Das diversas tecnologias desenvolvidas, duas acabaram sendo largamente adotadas em veículos automotores e usadas até hoje nos conhecidos motores do Ciclo Diesel e do Ciclo Otto, que levam os nomes de seus inventores. Os motores do Ciclo Diesel e do Ciclo Otto, hoje conhecidos, respectivamente, como “a diesel” e “a gasolina”, funcionam em quatro

etapas distintas, também chamadas de “tempos”. O funcionamento dos motores a quatro tempos a diesel e a gasolina estão ilustrados na **Figura 3**. A primeira etapa envolve a *admissão* de ar (ciclo Diesel), ou uma mistura aerossol contendo ar e combustível (ciclo Otto), enquanto ocorre a expansão do pistão. A seguir, acontece a *compressão* do ar, ou do aerossol, pelo pistão. O próximo tempo consiste na *expansão* do pistão que ocorre após uma explosão. No caso do Ciclo Diesel, a explosão ocorre de forma espontânea após a injeção do combustível no ar comprimido. Já no motor a gasolina, a explosão ocorre por uma fagulha que é acesa na mistura comprimida de ar e combustível. O efeito da explosão é semelhante para os dois motores. Em ambos a queima de hidrocarbonetos libera uma quantidade grande de energia e produz CO_2 e H_2O . Os gases aquecidos e comprimidos se expandem, fazendo com que o pistão se mova. Na última etapa, os gases da combustão são liberados enquanto o pistão volta à sua posição inicial. Outro motor a combustão interna bastante utilizado nos nossos dias é o turbojato, que é usado nos aviões modernos. Nestes motores, não há pistão, mas uma turbina que é movimentada pela expansão dos gases de combustão ao serem liberados para a atmosfera.

Os combustíveis usados nos motores a combustão interna também são de origem fóssil, como o carvão mineral. Tais combustíveis são formados por hidrocarbonetos obtidos em refinarias, usando como matérias-primas o petróleo e o gás natural, os quais

também são reservas de compostos de carbono encontradas no subsolo. Em busca de maior eficiência de queima e melhor desempenho, os motores a combustão interna evoluíram muito ao longo de seus mais de 100 anos de história e, junto com eles, os combustíveis usados. Hoje temos combustíveis com propriedades físico-químicas diversas e específicas para cada tipo de motor, e tais propriedades são ajustadas pela composição química de cada um deles. Por exemplo, a gasolina é formada por hidrocarbonetos aromáticos e alifáticos, majoritariamente com menos de 10 carbonos e altamente ramificados. No Brasil e em alguns outros países, a partir da década de 1980, o etanol derivado da cana-de-açúcar e do milho (veja capítulo 7) é adicionado à gasolina. Já o diesel é formado por hidrocarbonetos aromáticos e alifáticos, pouco ramificados, com majoritariamente mais de 10 carbonos. No Brasil e em alguns outros países, a partir dos anos 2000, iniciou-se a mistura de biodiesel ao diesel (veja capítulo 6). Já o gás natural veicular (GNV), presente em muitas das capitais brasileiras e usado em motores do ciclo Otto, é constituído majoritariamente por metano e outros hidrocarbonetos com menos de 5 carbonos. No caso de combustíveis para aviões, seja a gasolina de aviação (usada em motores do ciclo Otto tradicionais) ou o querosene de aviação (usado em turbojatos), os hidrocarbonetos são compostos aromáticos e alifáticos altamente ramificados.

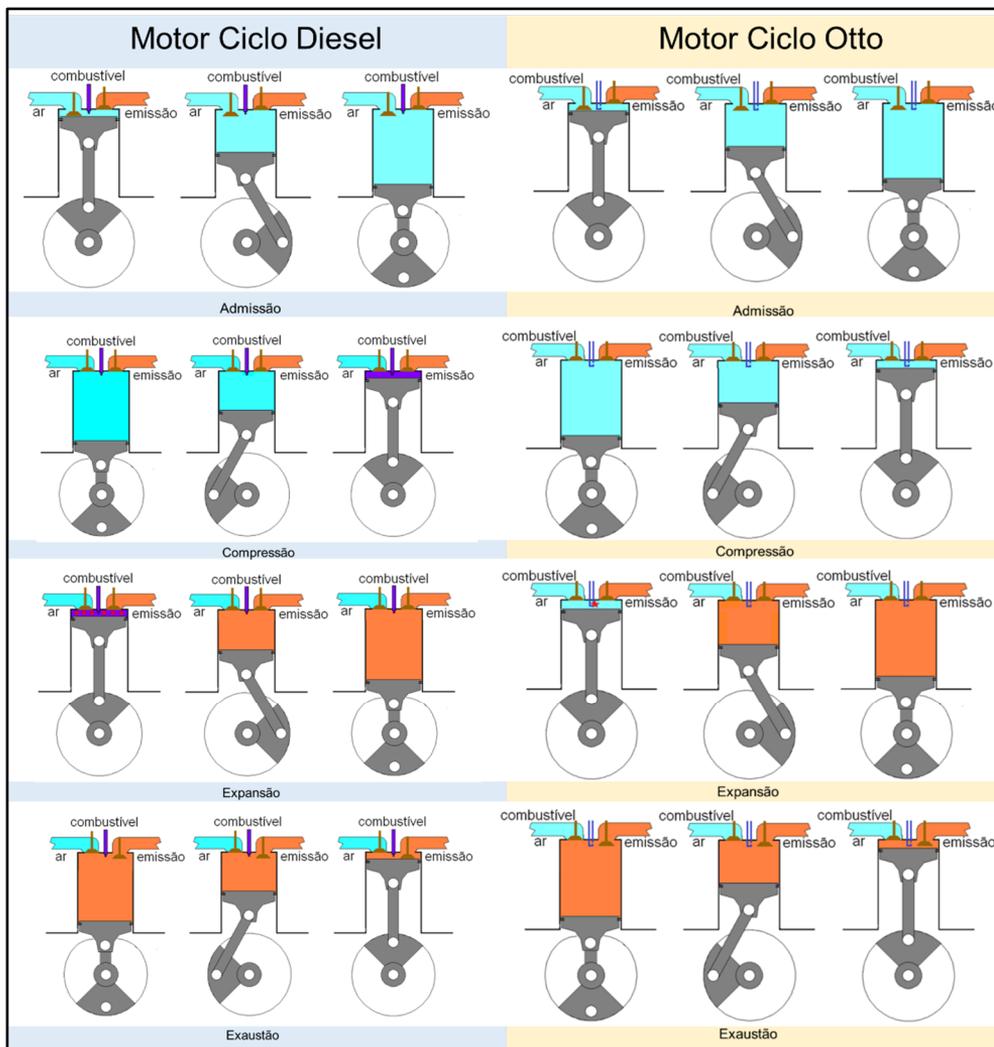


Figura 3. Funcionamento dos motores a combustão interna dos ciclos Diesel e Otto.

4- A máquina a vapor e uma outra e infeliz revolução: o início da era fóssil

A máquina a vapor, que possibilitou a revolução industrial trazendo uma inegável melhoria na qualidade de vida da humanidade, também acarretou um dos maiores impactos ambientais da sociedade moderna. Isto porque a máquina a vapor deu início à era da queima dos combustíveis fósseis (já mencionada no capítulo 3), considerada hoje como responsável pelas mudanças climáticas.

Para entender melhor o que são as mudanças climáticas, na Figura 4a é mostrado um esquema de como ocorre o “efeito estufa”. Diversos compostos presentes na atmosfera, como, por exemplo, o dióxido de carbono, agem como um escudo, impedindo que parte da radiação solar chegue até a superfície da Terra. Caso essa parte dos raios solares que é refletida chegasse até a superfície, as temperaturas poderiam ser superiores a 400 °C durante o dia, como acontece em Mercúrio. Mas não é só a reflexão que é benéfica para o nosso clima, a retenção de parte dos raios solares também é benéfica para o nosso clima. Os raios que ultrapassam a camada de gases do “efeito estufa” (radiações em alaranjado na Figura 4a) são em parte absorvidos pela superfície terrestre e em parte refletidos (radiações em amarelo na **Figura 4a**). Quando a radiação refletida

pela superfície da Terra atinge a camada de gases do “efeito estufa”, o mesmo fenômeno acontece: uma parcela é refletida e a outra atravessa, seguindo para fora da Terra. Ou seja, uma parcela da radiação que chega à Terra fica “presa” entre a superfície do planeta e a camada de gases, e é esse fenômeno que é chamado de “efeito estufa”. O principal resultado de tal efeito é uma variação menor da temperatura ao longo do dia, de alguns graus entre a temperatura máxima e a mínima. Planetas que não possuem atmosfera e “efeito estufa”, como nosso vizinho Mercúrio, têm variações de mais de 600 °C entre a noite e o dia, o que impediria a sobrevivência das formas de vida que temos na Terra. Portanto, o “efeito estufa” é um dos responsáveis pela possibilidade de vida no nosso planeta. Em contrapartida, variar a quantidade de gases responsáveis pelo “efeito estufa” irá alterar completamente o clima do planeta, e, como já mencionado, o dióxido de carbono é um dos envolvidos na formação de tal fenômeno. Assim, caso o teor de dióxido de carbono, ou de qualquer outro gás responsável pelo “efeito estufa”, seja aumentado na atmosfera, teremos um incremento na temperatura. Já no caso da diminuição no teor desses gases, a Terra ficará mais fria. A variação da temperatura na superfície terrestre acarreta diversos outros problemas, como o derretimento do gelo das calotas polares, ocasionando o aumento do nível do mar, secas ou excesso de chuvas, entre outros.

Mas o que a máquina a vapor, e posteriormente os motores a combustão interna, e a era dos combustíveis fósseis têm a ver com as mudanças climáticas decorrentes do “efeito estufa”? Na Figura 4b, podemos visualizar uma plantação de eucalipto no vale do Jequitinhonha em Minas Gerais. As folhas do eucalipto, como as de qualquer outro vegetal, captam o dióxido de carbono da atmosfera e o reagem com água na presença de uma molécula chamada clorofila. A clorofila catalisa a combinação do CO_2 e H_2O , na presença de luz solar, para produzir glicose e liberar o gás oxigênio, no processo chamado de fotossíntese. A glicose participa em outras reações bioquímicas que ocorrem no eucalipto, formando todos os tecidos da planta. Assim, o eucalipto cresce e forma troncos grossos, que são derrubados e cortados para se obter lenha, que, após um processo de pirólise, também formam o carvão vegetal. Tanto a lenha quanto o carvão vegetal são queimados para gerar calor, formando novamente CO_2 e H_2O . Em outras palavras, as moléculas de CO_2 emitidas quando queimamos a lenha, ou o carvão vegetal, não irão aumentar a quantidade de carbono na atmosfera, uma vez que houve a absorção desse gás durante a produção da biomassa que dá origem a esses biocombustíveis. O mesmo não pode ser dito a respeito da queima do carvão mineral, uma vez que esse combustível fóssil foi gerado há milhões de anos, também a partir de árvores e outras biomassas, e ficou armazenado em camadas subterrâneas. Na **Figura 4c**, é mostrada a mina Garzweiler II, uma das maiores minas

a céu aberto em funcionamento do mundo, localizada na Renânia, Alemanha. Quando se retira o carvão mineral da mina e ele é queimado para produção de eletricidade em termoelétricas, também é liberado CO₂. No entanto, como esse carvão estava no subsolo, o dióxido de carbono que é emitido irá aumentar o teor do gás na atmosfera, aumentando o “efeito estufa”. Mas o carvão não é o único vilão da história, pois todos os outros combustíveis fósseis, como os derivados de petróleo e gás natural, também aumentam o teor de carbono na atmosfera. Estimativas indicam que o teor de CO₂ na atmosfera passou de 280 ppm antes da Revolução Industrial para 450 ppm atualmente.

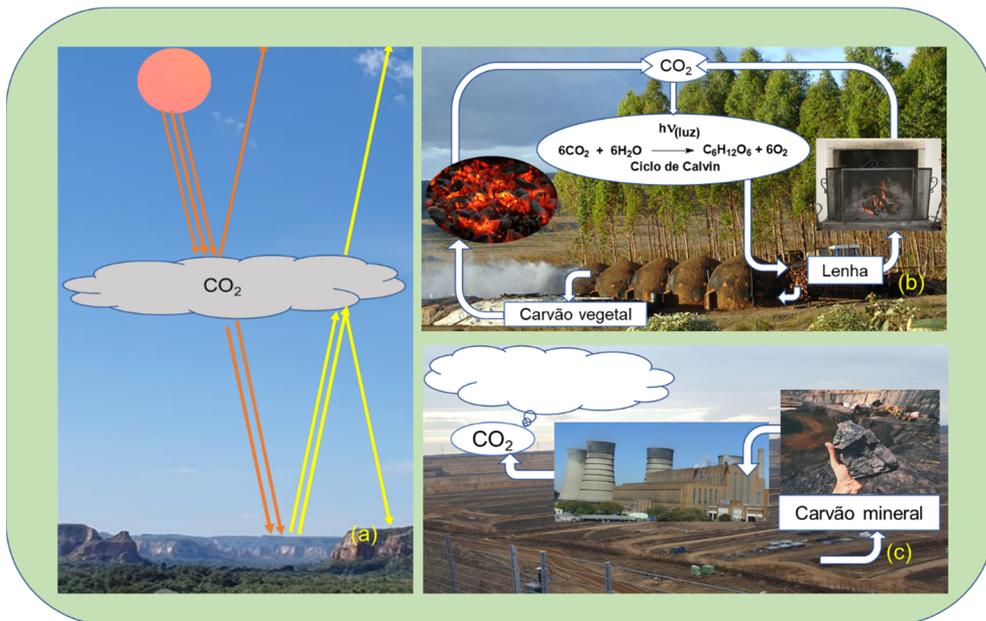


Figura 4. A era dos combustíveis fósseis e a mudança climática: (a) efeito estufa provocado por gases, como o dióxido de carbono presentes na atmosfera; (b) ciclo do dióxido de carbono envolvido na produção e queima de lenha e na produção de carvão vegetal em fornos redondos e sua queima; e (c) aumento do teor dióxido de carbono quando reservas de carvão mineral são queimadas.

5- Ambiente, sociedade e controle de produção: a transição dos combustíveis fósseis para soluções renováveis

De fato, o uso intensivo do calor de combustão para movimentar engrenagens mecânicas nos levou a substituir paulatinamente fontes renováveis de energia por combustíveis fósseis com alta densidade energética, tais como o carvão mineral e os derivados de petróleo e gás natural. Como já mencionado, a consequência dessa mudança da matriz energética mundial afetou de forma drástica o clima do planeta ao aumentar o teor de gases causadores do “efeito estufa” na atmosfera, principalmente o dióxido de carbono. Além disso, o uso de combustíveis fósseis provocou, e ainda provoca, inúmeras guerras pelo controle da exploração e distribuição desses recursos não renováveis e disponíveis em poucas regiões do planeta.

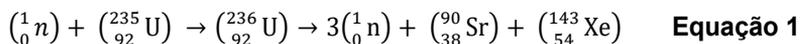
Durante a década de 1970, após sucessivos conflitos diplomáticos e armados, ocorreu um desabastecimento da oferta de combustíveis fósseis, e uma escalada sem precedentes nos preços.

Coincidentemente, nessa mesma década, a Organização das Nações Unidas (ONU) começou a promover conferências mundiais para tratar de mudanças climáticas. Em uma delas, ocorrida no Rio de Janeiro em 1992, chefes de estado de mais de 100 países concordaram, pela primeira vez, com o fato de que a queima de combustíveis fósseis estava provocando alterações no ambiente do planeta, o que poderia se tornar responsável por uma nova extinção em massa das formas de vida e colocando em risco o nosso próprio futuro.

Nesse contexto, por razões econômicas, sociais e ambientais, a comunidade internacional vem tentando modificar a matriz energética desde a década de 1970. Assim, diversas soluções, em sua maioria ambientalmente corretas e com produção descentralizada, estão sendo priorizadas em muitos países em que o uso do vento, da luz solar, da correnteza de rios e da queima de biomassa tradicional e de biocombustíveis têm um papel importante. Uma das apostas feita por diversos países, dentre eles o Brasil, foi a geração de eletricidade a partir da energia hidráulica. A energia hidráulica consiste em aproveitar a força da correnteza de cursos d'água, que ocorre graças à gravidade devido à diferença de altitude dos locais que percorrem. A água, seja oriunda da chuva ou de nascentes, desloca-se de pontos mais altos em direção ao mar. A força da correnteza há muito tempo é usada para movimentar engrenagens, como moinhos instalados em locais com grandes desníveis de um curso d'água, como cachoeiras. Modernamente, a

construção de grandes barragens eleva em dezenas de metros o nível dos rios, e essa diferença de altura gera uma força suficiente para movimentar turbinas geradoras de eletricidade. O Brasil, como um dos países com maior número de rios no mundo, possui diversas usinas hidrelétricas, e mais de 60% da nossa eletricidade é gerada nelas.

Outra aposta foram as usinas nucleares, que utilizam a energia térmica gerada por meio de reações de decaimento radioativo. Na Equação 1, é representada a reação de decaimento do isótopo de Urânio 235 quando bombardeado com um nêutron, o que constitui o processo nuclear usualmente usado nas usinas. Após sua transformação no extremamente instável isótopo de Urânio 236, este último se decompõe gerando três nêutrons e os isótopos Estrôncio 38 e Xenônio 54. Os três nêutrons gerados irão atacar três isótopos de Urânio 235, dando início a uma reação em cadeia. O calor gerado durante esse processo aquece a água e produz vapor superaquecido, o qual é usado para movimentar turbinas. Esta tecnologia é muito usada até hoje no mundo e, junto com usinas termoelétricas abastecidas com gás natural ou carvão mineral, é uma das principais fontes de eletricidade. No Brasil, existem apenas duas usinas nucleares em funcionamento: estão situadas na região de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, e são responsáveis pela geração de pouco mais de 2% da nossa eletricidade.



Na década de 1970 também surgiram diversas tentativas de diversificar a matriz energética por todo o globo, substituindo total ou parcialmente os combustíveis fósseis por derivados da biomassa. Nessa época no Brasil, além das apostas em instalações de usinas hidrelétricas e nucleares, também surgiram as primeiras iniciativas para o uso de biocombustíveis. Um dos programas, que é pouco conhecido e muito usado até hoje, foi o da substituição de carvão mineral pelo carvão vegetal em indústrias siderúrgicas. Já o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), criado em 1975, visava a substituição parcial ou total da gasolina em motores do ciclo Otto. Este programa também foi consolidado e funciona até os dias de hoje com crescimento anual constante do consumo de álcool. Também foi criado, no ano de 1980, o programa Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos (Pró-Óleo) que visava a adição de óleos vegetais e seus derivados ao óleo diesel. Porém, o Pro-Óleo, diferentemente do Proálcool, foi completamente abandonado em 1986 devido à normalização nos preços do petróleo. No ano de 2005, este programa foi retomado com o nome de Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), e o biodiesel, obtido de óleos e gorduras, foi inserido na matriz energética brasileira.

Outra forma de amenizar as emissões de carbono pelo uso dos combustíveis fósseis tem sido a escolha por moléculas que, mesmo sendo fósseis, sejam menos poluentes. Na **Tabela 1**, são mostrados

o poder calorífico e as quantidades de CO₂ e de H₂O emitidas durante a queima completa do carvão e de diferentes moléculas de origem fóssil. Note que essas moléculas são geralmente encontradas nos combustíveis que usamos no dia a dia, como o diesel, a gasolina e o GNV. Como se pode observar, quanto maior o teor de hidrogênio presente na molécula maior será a quantidade de energia obtida. Também se pode observar que, aumentando o teor de carbono da molécula, o percentual de moléculas CO₂ aumenta nas emissões em relação ao de H₂O.

Tabela 1- Poder calorífico (cal/g) e a quantidade de CO₂ (%) emitida por carvão e diferentes moléculas de origem fóssil, geralmente encontradas nos combustíveis que usamos no dia a dia, como o diesel, a gasolina e o GNV.

Reação	%CO ₂ nas emissões	Poder calorífico (cal/g)
$2 \text{ H}_2 + \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ H}_2\text{O}$	0	34.177
$\text{CH}_4 + 2 \text{ O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$	55	12.900
$\text{C}_6\text{H}_{14} + 9,5 \text{ O}_2 \rightarrow 6 \text{ CO}_2 + 7 \text{ H}_2\text{O}$	68	10.692
$\text{C}_{16}\text{H}_{34} + 24,5 \text{ O}_2 \rightarrow 16 \text{ CO}_2 + 17 \text{ H}_2\text{O}$	70	10.618
$\text{C}_{(s)} + \text{ O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	100	7.827

6- O uso da biomassa tradicional e os seus produtos de pirólise e gaseificação

Como já mencionado no Capítulo 1, o uso da queima direta de biomassa é tão antigo quanto a história do *Homo sapiens* e nunca deixou de fazer parte da nossa sociedade. Como exemplo, não é raro encontrarmos pizzarias ou padarias que funcionam com forno a lenha. A partir da década de 1970, diversas políticas incentivaram o uso da biomassa em larga escala para produção de energia em indústrias e geração termoelétrica. Assim, indústrias que tem disponibilidade de lenha ou resíduos, como bagaços e palhas, passaram a utilizá-los em caldeiras para geração de vapor de água. O vapor gerado é usado em etapas de processos industriais que necessitam de energia, como em reações endotérmicas e separações por evaporação. Outro uso corriqueiro da queima de biomassa é em termoelétricas, nas quais o vapor de água superaquecido e pressurizado movimentam turbinas para a produção de energia elétrica. Por exemplo, as usinas de cana-de-açúcar queimam todo o bagaço resultante da extração do caldo de cana para a geração do calor necessário para a produção de açúcar refinado e álcool. A queima do bagaço de cana em minitermoelétricas também fornece toda a eletricidade consumida pelas usinas, além de produzir excedente de energia, que é vendido.

A biomassa, principalmente a lenha oriunda de reflorestamento, também é usada como matéria-prima para a produção de carvão vegetal. O processo é bastante simples e consiste na degradação térmica da lenha em fornos fechados e na ausência de oxigênio, como mostrado na Figura 4b. Nesse processo, conhecido como pirólise, a madeira é carbonizada na ausência de oxigênio, liberando gases, vapor de água e diversos compostos orgânicos oxigenados, tais como fenóis e ácidos benzílicos. Inicialmente, a lenha é queimada até que o forno atinja uma temperatura alta e, então, a entrada de ar (fonte do oxigênio) é impedida, cessando a combustão e continuando apenas a pirólise. Além do carvão, a condensação dos vapores pirolíticos permite a obtenção de uma solução aquosa rica em compostos orgânicos oxigenados, chamada de ácido pirolenhoso, que é usado na indústria de alimentos como aromatizante, principalmente para se obter o sabor denominado “tipo” *bacon*, ou defumado.

Outra forma moderna de aproveitamento energético de biomassa, principalmente usando resíduos agroindustriais ou urbanos como podas e folhas, é a gaseificação. Nesse processo, que também ocorre na ausência de oxigênio, a biomassa triturada em pequenos pedaços é submetida a temperaturas superiores a 800 °C, ocorrendo a sua decomposição para formar moléculas pequenas, conforme ilustrado na Figura 5. A chamada pirólise a “baixa temperatura”, que ocorre entre 800 °C e 1000 °C, forma uma mistura de hidrocarbonetos

com baixa massa molar, contendo entre 1 e 4 carbonos, que pode ser usado como bio-GNV, e uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio chamada de biogás de síntese. Já a pirólise a “alta temperatura”, que ocorre entre 1000 °C e 1200 °C, forma apenas biogás de síntese. O biogás de síntese, que é uma mistura de moléculas de hidrogênio e monóxido de carbono, pode ser usado como matéria-prima em diversas reações orgânicas envolvendo a produção de diversos compostos, como aldeídos e ácidos carboxílicos, além de também ser utilizado para a produção de energia por meio da queima em termoelétricas. Uma outra aplicação do biogás de síntese está no processo de Fischer-Tropsch, no qual o gás reage na superfície de catalisadores sólidos para formar hidrocarbonetos lineares. O tamanho das cadeias dos hidrocarbonetos obtidos depende do catalisador usado, podendo-se ajustar o processo para obtenção de compostos na faixa de gasolina ou de diesel.

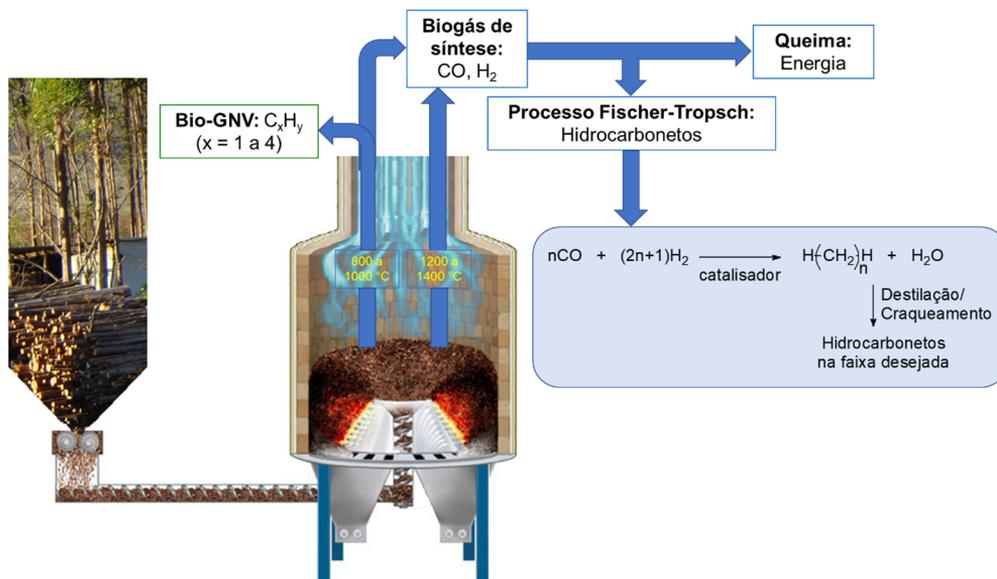


Figura 5. A gaseificação de biomassa para obtenção de bio-GNV e biogás de síntese, do qual se pode obter hidrocarbonetos de vários comprimentos de cadeia.

6- A produção de biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: biodiesel, diesel renovável e bioquerosene de aviação

Os óleos e gorduras são materiais insolúveis em água e, por isso, classificados como lipídeos. Os mesmos podem ser obtidos pelo processamento de insumos vegetais, animais ou microrganismos e seus principais componentes são ésteres de ácidos graxos e glicerol, mas sempre estão presentes ácidos graxos livres, como mostrado na parte central da **Figura 6**. Os ácidos graxos são ácidos carboxílicos que usualmente contêm uma cadeia linear de carbonos, podendo conter, ou não, insaturações (ligações duplas) e, com menor frequência, grupos funcionais, como álcoois ou cetonas, em sua estrutura. A composição dos óleos e gorduras varia conforme a fonte a partir da qual são obtidos, e pode conter mais de cinco tipos distintos de ácidos graxos que diferem pelo número de átomos de carbono e de insaturações, e esses ácidos graxos sempre estão ligados de forma aleatória ao glicerol. A utilização dos óleos e gorduras para diversos fins, tais como alimentares ou como combustíveis, talvez

remonte à idade em que o homem inicia o uso do fogo. Porém, o primeiro uso registrado de óleo vegetal como combustível em motores a combustão interna aconteceu durante a Feira Internacional de Paris, ocorrida entre abril e novembro de 1900 e protagonizada pelo engenheiro alemão Rudolf Christian Karl Diesel, inventor do referido motor. Diesel, que havia desenvolvido um motor para queimar combustíveis fósseis (pó de carvão mineral, petróleo e derivados), apresentou nessa exposição o seu invento utilizando óleo de amendoim como combustível por demanda do governo francês. A partir de então, durante períodos de escassez de petróleo no mercado internacional, como durante a Primeira e a Segunda Guerra Mundial, o uso dos óleos e gorduras oriundos de fontes vegetais ou animais sempre foi apontado como alternativa aos combustíveis fósseis, seja pelo seu uso direto ou pela transformação química.

Nos motores do ciclo diesel modernos, não é mais possível utilizar óleos e gorduras diretamente, pois suas propriedades físico-químicas, como viscosidade e densidade, são diferentes do combustível usado atualmente. Assim, diversas tecnologias vêm sendo estudadas para transformar matérias-primas graxas em biocombustíveis que possam ser usados diretamente sem necessidade de se alterar os motores. As duas primeiras reações propostas para tornar os óleos e gorduras compatíveis com o combustível diesel datam ainda do período da Segunda Guerra

Mundial. A primeira proposta surgiu na Bélgica no final da década de 1930 quando foram obtidos ésteres metílicos e etílicos de ácidos graxos, hoje conhecidos como biodiesel, sintetizados a partir de óleos e gorduras, por meio da reação de transesterificação mostrada na **Figura 6a**. A segunda proposta consiste na produção de hidrocarbonetos por craqueamento termo-catalítico de óleo de tungue, extraído de uma fruta originária da China e muito usado na indústria de tintas e vernizes. Os chineses, durante a década de 1940, realizaram o craqueamento do óleo de tungue diretamente em refinarias de petróleo, como ilustrado na **Figura 6b**. No entanto, devido à sua elevada disponibilidade e baixo custo, o petróleo se consagrou como matéria-prima para combustível dos motores diesel, e as tecnologias para produção de biocombustíveis ficaram em desuso após o final do período de guerra devido à normalização do mercado.

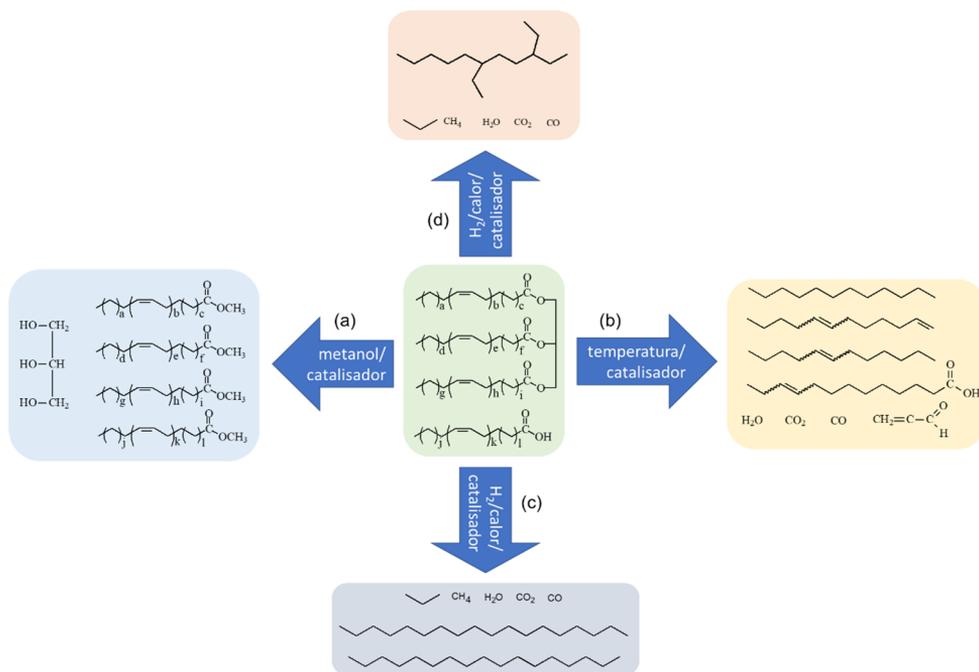


Figura 6. Reações para obtenção de biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: (a) obtenção de ésteres metílicos por transesterificação; (b) obtenção de hidrocarbonetos por craqueamento termo-catalítico; (c) obtenção de hidrocarbonetos alifáticos lineares por hidrocraqueamento; e (d) obtenção de hidrocarbonetos alifáticos ramificados por hidrocraqueamento e isomerização catalíticas.

A retomada do uso de óleos e gorduras como fontes de combustíveis líquidos somente foi considerada durante as crises do petróleo em 1973 e 1979, momentos em que houve elevação dos custos de produção e choques de oferta. A partir desse período, mas principalmente dos anos 1990 em diante, a consciência ambiental que relaciona o aquecimento global com a elevada queima de combustíveis fósseis se somou aos problemas econômicos e

estruturais, e a busca por soluções sustentáveis na área de combustíveis líquidos e geração de energia em geral se fez mandatória. Assim, a partir do final da década de 1970, muitos países, tais como Brasil, Estados Unidos, Áustria, Alemanha e França, desenvolveram estudos visando a produção e uso de óleos e gorduras e seus derivados como combustíveis líquidos. Os processos de craqueamento e transesterificação foram aperfeiçoados por meio da incorporação de novas tecnologias de catalisadores e de processos. Vale destacar que o craqueamento foi o processo que mais se alterou com pesquisas recentes, com a introdução de gás hidrogênio e catalisadores multifuncionais, os quais conseguem eliminar completamente o oxigênio dos produtos resultantes. Na **Figura 6c**, é mostrado o processo de hidrocraqueamento, que produz majoritariamente uma mistura de hidrocarbonetos lineares compatíveis com os motores do ciclo diesel que é chamada de diesel renovável. Já a **Figura 6d** mostra o processo de hidrocraqueamento e isomerização, por meio do qual é possível obter hidrocarbonetos com alto grau de ramificação, usados principalmente como combustíveis em aeronaves e chamados de biogasolina e bioquerosene de aviação.

7- O bioetanol tradicional (1G) e o de segunda geração (2G)

Como já mencionado, o Proálcool foi uma política do Governo Federal de incentivo à produção de álcool etílico (ou etanol) e seu uso como combustível para substituir a gasolina em motores veiculares do ciclo Otto. No Brasil, o uso do etanol como combustível é feito de dois modos. No primeiro modo, emprega-se etanol anidro, com conteúdo de até 0,4% de água, em mistura com a gasolina, uma vez que, no nosso país, não se vende gasolina pura para uso direto em automóveis. O percentual do álcool anidro na mistura variou bastante ao longo dos anos, sendo hoje obrigatório o teor de etanol de 27%. Já o segundo modo consiste no uso do chamado etanol combustível, que é álcool etílico hidratado, contendo até 4,9% de água, e que é vendido diretamente nos postos de abastecimento. No início do Proálcool, foram comercializados no país automóveis com motores do ciclo Otto movidos a gasolina ou a álcool. Hoje não são mais comercializados automóveis movidos exclusivamente a álcool, sendo a maioria equipados com motores *flex*, os quais podem queimar tanto álcool hidratado quanto gasolina, puros ou misturados em qualquer proporção.

O álcool etílico (ou etanol) é um líquido incolor, inflamável e de odor característico utilizado nos mais diversos tipos de indústria. É

uma substância química com fórmula molecular C_2H_6O , que pode ser obtido por síntese química ou por fermentação. Na síntese química, o etanol é produzido a partir da hidratação do eteno, como mostrado na **Figura 7a**, a qual ocorre na presença de catalisadores ácidos. Esse processo apenas possui competitividade econômica em países com grandes reservas de petróleo e indústria petroquímica avançada. Obviamente, o etanol obtido por esta rota utiliza matéria-prima fóssil, não podendo ser considerado um biocombustível. Já a fermentação é um processo bioquímico realizado por microrganismos, em especial as leveduras, que transformam açúcares simples, como a glicose e a frutose, em etanol e dióxido de carbono, como mostrado na **Figura 7b**. O processo de obtenção de bioetanol consiste no preparo do substrato, sua fermentação e destilação do fermentado.

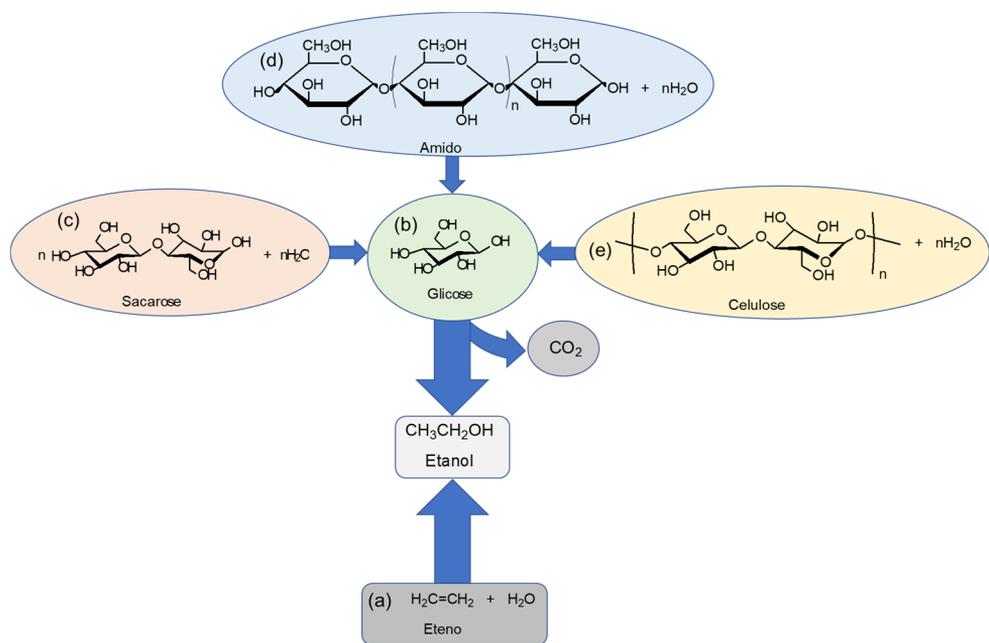


Figura 7. Reações para obtenção de etanol: (a) hidratação de eteno, que ocorre na presença de catalisador ácido; (b) fermentação alcoólica de monossacarídeos para produção de etanol e dióxido de carbono; (c) obtenção de monossacarídeos a partir da hidrólise da sacarose; (d) preparação de monossacarídeos a partir da hidrólise de amido; e (e) produção de glicose a partir da hidrólise de celulose.

O processo de obtenção da solução que é usada para realizar o processo de fermentação varia em função da natureza da matéria-prima, e contém açúcares simples, ou seja, carboidratos com seis átomos de carbono (monossacarídeos), como a glicose, a frutose e a maltose, ou 12 átomos de carbono (dissacarídeos), como a sacarose. Os monossacarídeos são encontrados nos sucos de frutas e são diretamente fermentescíveis, sendo utilizados apenas na produção de

álcool em bebidas como vinho e sidra. Já os dissacarídeos (encontrados, por exemplo, na cana-de-açúcar, na beterraba açucareira, nos melaços e no mel de abelhas) são fermentados após uma hidrólise, para obtenção da glicose, que ocorre pela ação da enzima invertase, como mostrado na **Figura 7c**. Já os materiais amiláceos (grãos como o milho, o sorgo, a cevada e o trigo, ou raízes e tubérculos, como a batata, a batata-doce e a mandioca) são compostos por carboidratos mais complexos, como amido e a inulina, os quais podem ser quebrados em glicose pela hidrólise ácida ou ação de enzimas num processo denominado malteação, ou sacarificação, como mostrado na **Figura 7d**. O uso destas matérias-primas para a obtenção de açúcares fermentescíveis é feito pelo homem há milênios, principalmente para a obtenção de bebidas alcoólicas. O álcool obtido por elas para aproveitamento energético é conhecido como bioetanol de primeira geração (1G).

Atualmente, estão sendo desenvolvidos processos de obtenção de açúcares fermentescíveis a partir de açúcares complexos e de difícil hidrólise, principalmente a celulose, hemicelulose e pectina, como mostrado na **Figura 7e**. Esta via permite a obtenção de açúcares simples a partir de resíduos, tais como palha e bagaço de cana-de-açúcar, palhas de milho e sorgo, madeiras e folhas recolhidas em cidades, entre outros. A reação de hidrólise dos polissacarídeos complexos é realizada em condições bastante drásticas de temperatura e pressão, principalmente a hidrólise ácida. O álcool

obtido a partir destas matérias-primas é conhecido como bioetanol de segunda geração (2G), ou simplesmente etanol celulósico.

O etanol 1G e o 2G têm a mesma composição e idênticas propriedades físico-químicas e sua diferença reside apenas no tipo de matéria-prima empregada para a obtenção dos açúcares fermentescíveis. No entanto, os processos de fermentação e destilação são semelhantes em ambos os casos. Atualmente, os dois maiores produtores, responsáveis por cerca de 80% do bioetanol produzido no mundo, são os Estados Unidos (48,2%) e o Brasil (26,4%), utilizando, como principais matérias-primas, o milho e a cana-de-açúcar, respectivamente. Assim como já explicado no Capítulo 4, os vegetais retiram CO_2 da atmosfera para produzir glicose e, assim, gerar as biomassas usadas nos diferentes processos envolvidos na produção dos álcoois oriundos de fermentação, tanto 1G quanto 2G. Assim, a queima de bioetanol, apesar de não ser completamente limpa, como será discutido no Capítulo 12, não aumenta a concentração de CO_2 da atmosfera com a mesma intensidade que ocorre quando a gasolina derivada do petróleo é queimada, o que o torna uma opção de combustível mais limpo em relação aos fósseis.

8- As turbinas eólicas e o desenvolvimento de materiais

O vento, que é considerado fonte renovável de energia, resulta do movimento da atmosfera devido à associação entre o aquecimento da superfície da Terra pelos raios solares e a rotação planetária, num fenômeno conhecido como mecanismo solar-planetário permanente. Assim, os planetas do nosso sistema solar que são envoltos por gases exibem distintas formas de circulação atmosférica e apresentam ventos em suas superfícies. O aproveitamento pelo homem da força dos ventos, conhecida como energia eólica, iniciou-se no Oriente há milhares de anos, principalmente para movimentar barcos e navios com o uso de velas. O desenvolvimento e melhoria desses dispositivos, durante a Idade Média, resultou nas grandes navegações. Já no século XIV, na Holanda, foram aperfeiçoadas as máquinas eólicas conhecidas como moinhos de vento, cujas potências eram suficientes para garantir uma ampla aplicação como fonte de energia, principalmente em moagem de grãos, serrarias e bombeamento d'água. Nos anos 1500, havia muitos moinhos de vento em toda a Europa, expandindo a sua aplicação para a fabricação de papel para a imprensa, na extração de óleos vegetais e até em grandes projetos de drenagem. Com a expansão do emprego das máquinas a vapor, os moinhos de vento europeus entraram

gradualmente em desuso. No entanto, a partir do século XIX, ocorreu nos Estados Unidos a disseminação da utilização do cata-vento múltiplos para bombeamento de água, os quais, graças ao preço acessível para a população, tiveram seu uso expandido no mundo todo. Entre 1930 e 1960, os Estados Unidos deram início à produção de eletricidade a partir de pequenos aerogeradores para carregamento de baterias, o que favoreceu o acesso à energia elétrica aos habitantes do meio rural, até mesmo chegando a exportar tais dispositivos. No entanto, com a ampliação da rede de eletrificação rural, a maioria desses sistemas começou a ser desativada a partir da década de 1960.

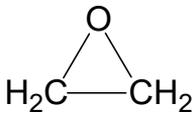
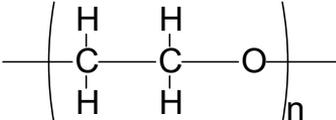
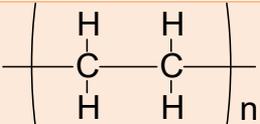
Entre as décadas de 1970 e 1980, devido à primeira crise de preços do petróleo, comentada anteriormente, diversos países – entre eles o Brasil – investiram em pesquisa sobre utilização da energia eólica para geração elétrica. O principal objetivo era a substituição de usinas termoeletricas que utilizam combustíveis fósseis. Um exemplo marcante desses primeiros esforços foi o desenvolvimento da turbina DEBRA 100kW, em conjunto entre Brasil e Alemanha (DEBRA = DEutsche BRAsileira). A expansão do uso desses sistemas ocorreu principalmente a partir dos anos 2000. Hoje, modernos parques de turbinas eólicas para produção de energia elétrica são facilmente encontrados pelo mundo todo, passando a fazer parte da paisagem, como é o caso de diversas regiões do litoral nordestino. A maioria das turbinas eólicas está instalada em terra firme, porém elas também

podem ser encontradas no mar (*offshore*). As turbinas eólicas *offshore* estão posicionadas a mais de 10 km da costa, onde, devido à força e regularidade dos ventos marinhos, funcionam com mais continuidade do que em terra, podendo gerar até 60% mais energia do que uma turbina eólica terrestre.

Um dos grandes desafios para o desenvolvimento das turbinas eólicas eficientes foi encontrar materiais de construção que fossem leves e com alta resistência. Para se ter uma ideia, as turbinas utilizadas hoje podem medir de 10 m a 120 m de altura, com pás de 5 m a 90 m de comprimento, e funcionam com ventos atingindo velocidades entre 10 km/h e 90 km/h. Quando o vento possui velocidades superiores a esse limite, a turbina precisa ser desligada, pois pode sofrer danos. A indústria química teve um papel fundamental no desenvolvimento de materiais que garantissem a leveza e integridade das pás das turbinas. A solução foi o uso de materiais conhecidos como compósitos, os quais são formados a partir de resinas (matrizes) reforçadas com fibra de vidro e, mais recentemente, com fibras de carbono aramidadas (Kevlar), além de materiais secundários como colas e vernizes. Tipicamente, as resinas termofixas (que não se deformam sob a ação do calor) usadas como matrizes em tais compósitos são poliéteres obtidos a partir de epóxidos, representando cerca de 80% do mercado de polímeros reforçados para esse fim. Sua vantagem é a possibilidade de se obter a resina por polimerização do epóxido já no molde e em temperatura

ambiente. Esse processo de polimerização para obtenção de resinas usualmente é chamado de *cura*. Como o material de partida, no caso os epóxidos, possui baixa viscosidade, seu uso facilita a infusão das fibras e, portanto, permite grande velocidade de processamento. Os outros 20% do mercado é constituído pelo emprego de resinas termoplásticas, como polietileno, polipropileno e nylon, os quais podem ser reciclados. Neste caso, os polímeros são obtidos em indústrias petroquímicas e necessitam ser aquecidos para amolecerem e serem colocados no molde. Devido à maior viscosidade desse tipo de material quando amolecido, em comparação aos precursores das resinas termofixas, existe maior dificuldade de se misturar as fibras. Assim, a fabricação de peças grandes (acima de 2 m) e grossas (mais de 5 mm) se torna mais trabalhosa. Na Tabela 2, são mostradas as estruturas dos monômeros e dos polímeros das duas principais resinas usadas como matrizes nos compósitos comumente encontrados em pás de turbinas eólicas. Evidentemente, o desenvolvimento de novos materiais é constante, como mostram estudos recentes sobre a possibilidade de usar compostos de madeira, como madeira-epóxi ou madeira-fibra-epóxi.

Tabela 2- Estruturas dos monômeros e dos polímeros das duas principais resinas usadas como matrizes em compósitos comumente encontrados em pás de turbinas eólicas.

Monômero	Resina (polímero)	Classificação
		Termorrígido
		Termoplástico

9- A energia do Sol

O termo energia solar abrange a luz e o calor emitidos pelo sol que chegam à superfície da Terra. A energia solar pode ser captada por meio de diversas tecnologias, podendo ser transformada em energia térmica (calor), como em aquecedores solares e usinas heliotérmicas, ou empregada na produção direta de energia elétrica no caso dos painéis fotovoltaicos. A energia solar é considerada uma fonte de energia limpa, constituindo uma das alternativas mais promissoras para o setor energético. As principais vantagens da utilização da energia solar residem no fato de que ela é uma fonte renovável e inesgotável de energia, não poluente e que exige pouca manutenção em suas instalações de produção. Como contraponto, algumas discussões apontam como desvantagens o grande consumo energético para produção dos painéis solares, a produção de energia dependente das condições atmosféricas e da hora do dia, e dificuldades de armazenamento dessa forma de energia. Não por acaso, no Brasil, as regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste destacam-se na produção e uso de energia solar, principalmente para o aquecimento de água, mas cada vez mais para a produção de eletricidade.

O aproveitamento da energia térmica dos raios solares é a forma mais simples e é usada principalmente para aquecer a água de residências, hotéis e clubes. Em geral, o líquido passa por uma

tubulação exposta à luz solar. Geralmente, a tubulação é pintada de preto para absorver a luz solar com mais eficiência, podendo ser confeccionada em materiais de baixo custo, como o polietileno ou o polipropileno, ou mais caros, mas com melhor capacidade de troca térmica, como o cobre e o aço inox. A eficiência pode ser melhorada com a confecção de artefatos que concentram os raios solares em um ponto onde a tubulação é colocada, como é o caso de espelhos côncavos. Outra forma é o uso de artefatos que simulam o “efeito estufa” (veja Capítulo 4) por meio da colocação das tubulações no interior de caixas com tampas de vidro, tecnologia conhecida como painel solar. A água aquecida é armazenada em um reservatório térmico (Boiler), que consiste em cilindros termicamente isolados com espumas de poliuretano expandido, onde permanece aquecida até que seja consumida. Nos últimos anos, a energia térmica do sol também tem sido usada para gerar eletricidade em usinas heliotérmicas. Para que isso seja possível, é necessária uma placa solar ou sistema de espelhos com alta eficiência de forma a elevar a temperatura de um líquido bem acima do ponto de ebulição da água. Tal líquido armazena o calor, aquecendo a água e produzindo vapor superaquecido e pressurizado. Como em qualquer outra usina termoelétrica, o vapor gerado movimentava turbinas que produzem energia elétrica. Além disso, os painéis solares estão cada vez mais eficientes e com custos cada vez mais baixos, tornando essa forma de energia bastante viável em lugares afastados e de difícil acesso.

Já a captação fotovoltaica converte diretamente a energia da radiação solar em energia elétrica, mediante um fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico. Para tanto, são utilizadas células fotovoltaicas, que são compostas por materiais semicondutores. Normalmente, estes são confeccionados na forma de placas de silício, na sua forma elementar, acrescido de outros elementos como o boro ou o fósforo. Essa técnica de produção de semicondutores pela adição de pequenas quantidades de um elemento sobre outro é conhecida como “dopagem”. A adição de boro em pequenas quantidades ao silício gera um semicondutor do tipo p , ou positivo, uma vez que ele tem menos elétrons na camada de valência que o silício. Já a dopagem com fósforo, que tem mais elétrons na camada de valência do que o silício, produz um semicondutor do tipo n , ou negativo. Ao incidir sobre as células, a luz solar provoca a movimentação dos elétrons do material devido à uma diferença de potencial entre os semicondutores do tipo p e do tipo n , gerando eletricidade.

A evolução da energia solar fotovoltaica teve início a partir da pesquisa do físico francês Alexandre Edmond Becquerel, que em 1839 iniciou seus estudos sobre o efeito fotovoltaico. Na sequência, Charles Fritts, um inventor de Nova York, concebeu a primeira célula fotovoltaica produzida por selênio revestido de ouro em 1883. Este marco da tecnologia permitiu gerar uma corrente contínua e constante. Em 1954, o químico Calvin Fuller, do Bell Laboratories nos

Estados Unidos, elaborou o processo de dopagem do silício, que deu origem à era moderna da história da energia solar. O processo moderno de fabricação de painéis fotovoltaicos envolve o uso de muitos materiais avançados, como os semicondutores que compõem as células fotovoltaicas, o vidro fotovoltaico (especial para a fabricação do painel solar), filmes de polímeros como acetato-vinila de etileno (EVA), polifluoreto de vinila (PVF) e politereftalato de etileno (PET), além do encapsulante para o painel solar e da moldura de alumínio anodizado que envolve o painel.

O desenvolvimento tecnológico constante levou à redução dos preços dos painéis. As novas tecnologias também melhoraram a eficiência de conversão da energia solar em elétrica. Só para se ter uma ideia, a primeira célula solar tinha uma conversão máxima de 1%, enquanto, hoje em dia, a eficiência é superior a 30%, ou seja, hoje mais de 30% da energia solar que atinge a célula é convertida em energia elétrica. Assim, as células solares se tornaram uma realidade em diversos países, dentre eles o Brasil, seja para uso doméstico ou em maior escala (agricultura, indústria, entre outros). Atualmente, o Brasil possui mais de 30 mil geradores de energia fotovoltaica e esta quantidade aumenta todo ano. Além disso, existem no país cerca de 500 mil coletores solares residenciais.

10- As baterias e o armazenamento de eletricidade

Uma das grandes vantagens do uso da energia da combustão é a possibilidade de armazenar e transportar os combustíveis, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos. As primeiras locomotivas a vapor, mesmo com baixa eficiência, conseguiam se locomover carregando a quantidade de carvão ou a lenha necessária. No entanto, a eletricidade, seja proveniente de energia hidráulica, solar ou eólica, está limitada no local e momento de sua geração e é de difícil armazenamento. Por exemplo, a luz artificial que usamos à noite, ou em um dia nublado, jamais poderia ser obtida diretamente por energia solar. Da mesma forma, a energia eólica depende dos ventos, os quais não são contínuos e nem possuem sempre a velocidade adequada que permita sua obtenção. Por outro lado, o uso direto de energia elétrica para movimentar veículos também não é uma tarefa simples, a não ser que sejam realizados trajetos curtos ou quando é possível o fornecimento contínuo de eletricidade, como é feito em trens e metrô elétricos. Assim, a portabilidade e armazenagem da eletricidade não constitui um desafio simples e exigiu o desenvolvimento de tecnologias apropriadas, que são aquelas empregadas nas pilhas e baterias. Hoje em dia, as pilhas e baterias estão tão presentes no nosso dia a dia que, na maioria das vezes,

esquecemos da presença delas. Do celular ao controle remoto da televisão, do arranque às luzes de um automóvel, e em uma infinidade de outros usos, o armazenamento de eletricidade em tais dispositivos é essencial para a vida moderna.

Mas qual é o fenômeno que permite armazenar eletricidade em pilhas e baterias? As pilhas são dispositivos que permitem converter energia elétrica em energia potencial química e vice-versa. Para tal, é necessária uma reação química reversível e que ocorra a passagem de elétrons de um reagente para o outro. A primeira pilha foi desenvolvida em 1800 pelo físico italiano Alessandro Volta, e consistia em discos de prata e zinco em igual número e “empilhados” alternadamente, com um disco de papel molhado com salmoura entre eles. Com essa montagem, Volta descobriu que ligando um fio em um disco da base da pilha e outro fio no disco do topo e colocando ambos em contato era produzida uma corrente de elétrons. Na Figura 8^a, é mostrada uma pilha desenvolvida em 1836 pelo químico inglês John Daniell, considerada o segundo artefato capaz de transformar energia química em eletricidade. Na pilha de Daniell, existem dois compartimentos nos quais são colocadas barras de zinco e cobre em contato com uma solução, respectivamente, de sulfato de zinco e sulfato de cobre. Os compartimentos estão separados por uma parede porosa, que permite a passagem de íons. A reação espontânea da pilha, como mostrada na Figura 8a, irá oxidar o zinco metálico da barra, que passa para a solução na forma de um cátion

(Zn^{+2}). Os dois elétrons migram pelo fio para a barra de cobre, e vão atrair um cátion (Cu^{+2}) da solução e reduzi-lo a cobre metálico, que ficará aderido na superfície metálica. Nesse processo, um ânion sulfato (SO_4^{-2}) irá migrar pelos poros da parede do compartimento do cobre para o do zinco. Essa passagem de elétrons pelo fio constitui a corrente elétrica gerada continuamente nas pilhas, até que não haja mais zinco metálico para ser oxidado ou cátions de cobre para serem reduzidos. Nesse momento, a pilha para ou, como dito coloquialmente, descarrega-se. Para recarregar a pilha será necessário realizar o processo inverso, chamado de eletrólise, como mostrado na Figura 8b. Na eletrólise é colocada uma corrente elétrica que irá forçar que ocorra a reação contrária, ou seja, que o cobre metálico seja oxidado e os cátions de zinco sejam reduzidos. Dessa forma, as barras metálicas e as soluções voltarão ao estado inicial, e a pilha estará “carregada” novamente. Para reiniciar a reação espontânea, basta cessar a corrente externa que foi colocada. Assim, podemos armazenar a eletricidade na forma de energia potencial química no processo de eletrólise e usá-la quando desejado, por meio da reação espontânea que ocorre na pilha. Teoricamente, esse processo de carregar e descarregar uma pilha poderia acontecer infinitamente, mas todos já tiveram algum celular ou computador com “bateria viciada”, ou seja, que se descarrega rapidamente. O que acontece nesses casos é a perda do contato elétrico de alguma parte do material. Por exemplo, imagine que uma pequena parte do cobre

que é reduzido na pilha de Daniell não fique aderido à barra metálica e caia para o fundo do compartimento. No momento de recarregar a pilha, pela falta de contato elétrico, essa porção não será oxidada para formar cátions de cobre. Assim, haverá menos cátions de cobre para participar posteriormente da reação espontânea e a pilha irá descarregar mais rápido. Esse fenômeno pode ocorrer também com o zinco, com perda de material que se reduziu durante a eletrólise. A voltagem gerada por uma pilha é determinada pela diferença entre os potenciais de oxidação envolvidos nos dois eletrodos (o de oxidação, chamado ânodo, e o de redução, chamado cátodo), chamados de par redox. Já a quantidade de corrente corresponde ao número de elétrons que circulam de um eletrodo para o outro, e é determinada pelo total de material que se oxida e se reduz por unidade de tempo. Para se aumentar a voltagem e a corrente, pode-se utilizar uma “bateria” de pilhas, unidas em série ou em paralelo.

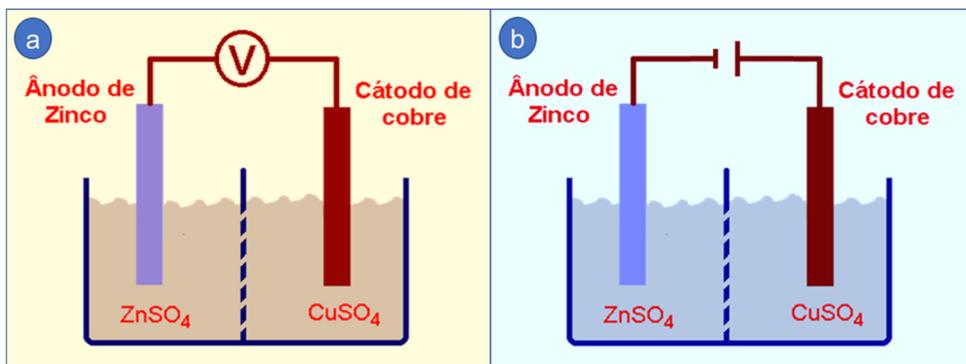


Figura 8. A pilha de Daniell: (a) a reação espontânea que gera uma corrente contínua; e (b) aplicação de energia externa para forçar a reação não espontânea.

A química, mais uma vez, tem um papel importante no desenvolvimento tecnológico de novas pilhas e baterias, as quais são cada vez mais compactas, leves e mais eficientes na conversão de energia elétrica em química e vice-versa. Como já mencionado, vários equipamentos do nosso dia a dia já funcionam de forma satisfatória com as pilhas e baterias conhecidas. No entanto, este desenvolvimento ainda está longe de conseguir produzir baterias que permitam, por exemplo, longos tempos de uso em equipamentos com alto consumo de energia. Esta limitação é um dos principais obstáculos em diversos setores, como no de carros elétricos, que ainda possuem baixa autonomia de funcionamento, podendo rodar apenas algumas dezenas de quilômetros, e que necessitam de tempos longos para recarregar as baterias.

11- Nem tudo que reluz é ouro: análise do ciclo de vida

Cada vez mais aparecem notícias na mídia sobre os carros ou mesmo aviões elétricos. Silenciosos e sem nenhuma fumaça, os veículos elétricos, apesar de ainda possuírem limitações tais como a baixa autonomia e longos tempos de recarga das baterias, mostram-se como uma excelente alternativa que não polui e nem agride o meio ambiente. Mas será que podemos afirmar que encontramos uma solução realmente sustentável? A resposta, infelizmente, é não. A primeira questão que se coloca é qual a fonte de energia que foi usada para produzir a energia elétrica usada pelo carro. Por exemplo, imagine um carro elétrico rodando na Alemanha. Ao verificarmos a matriz energética alemã, veremos que a principal fonte de produção de eletricidade é a queima de carvão mineral ou de gás natural, ou seja, combustíveis fósseis altamente poluentes. Em outras palavras, a queima do combustível fóssil continua acontecendo, só que não no veículo, mas a vários quilômetros dali, como se fosse aquela sujeirinha que escondemos embaixo do tapete. Mas o CO₂ continua sendo produzido e contribuindo para aumentar a quantidade deste gás de efeito estufa. Mesmo em um país como o Brasil, onde a maior parte da eletricidade provém de usinas hidrelétricas, o uso de carros elétricos também irá contribuir para o aumento dos gases de efeito

estufa. Sim, a hidroeletricidade não é totalmente limpa uma vez que, para a sua geração, como já comentado, são construídas grandes barragens que dão origem a lagos artificiais. No leito profundo desses lagos, a falta de oxigenação permite o desenvolvimento de bactérias anaeróbias, as quais decompõem a matéria orgânica para gerar metano (CH_4). Estudos mostram que o CH_4 é um gás que provoca até 20 vezes mais efeito estufa do que o CO_2 . Cabe ressaltar que a oxigenação é favorecida no caso de cursos d'água, como, por exemplo, um rio que corre livremente, não gerando, portanto, esse tipo de gás. Além disso, outro fator a ser levado em conta é a energia gasta e o impacto ambiental que envolve a fabricação do carro e, principalmente, das baterias que possibilitam armazenar a eletricidade e tornar o veículo automotivo. A eletricidade gerada em painéis solares ou em grandes turbinas eólicas também possui uma pegada de carbono a ser considerada, pois a produção dos elementos que compõem estes dispositivos também envolve um impacto ambiental considerável!

E o que se pode falar dos biocombustíveis? No Capítulo 4, foi considerado que o CO_2 emitido pela queima da biomassa não aumentava o teor de carbono da atmosfera, uma vez que ele havia sido captado pelos vegetais durante a síntese da glicose, que dá origem aos tecidos vegetais. Essa consideração era totalmente verdadeira quando o *Homo sapiens* iniciou o uso do fogo, queimando restos de árvores recolhidos nas florestas, mas hoje existe a

necessidade de uma reflexão. Pense no processo envolvido na produção de cana-de-açúcar: tratores movidos a diesel são usados para arar o terreno, insumos químicos são adicionados para melhorar a fertilidade da terra, bombas são usadas para irrigação e, finalmente, colheitadeiras, tratores e caminhões, que são abastecidos com combustíveis fósseis, levam a cana até a usina. O álcool produzido na usina necessita ser levado até os postos de combustíveis, o que também envolve o uso de caminhões movidos a diesel. Ou seja, para que a biomassa seja produzida, transformada em biocombustível e levada até o abastecimento do carro, muito combustível fóssil é queimado, o que também contribui para o aumento dos gases do efeito estufa. Seguindo essa mesma reflexão, a gasolina queimada no carro, ou o diesel usado em caminhões, tem um longo caminho até chegar aos veículos, pois o petróleo deve ser extraído e refinado para se obter combustíveis, e estes também devem ser transportados até o posto de abastecimento. Ou seja, a poluição dos combustíveis fósseis vai além da sua própria queima, pois muita energia é gasta até que ele seja colocado no tanque dos veículos.

Mesmo quando consideramos um determinado combustível, é importante analisar quais processos diferentes de produção podem ser usados, e cada caminho terá um impacto ambiental diferente. Por exemplo, foi escrito no Capítulo 8 que existem diferentes rotas para a obtenção de bioetanol, sendo que as principais matérias-primas usadas hoje são a cana-de-açúcar e o milho. Para cada litro de

combustível fóssil utilizado na lavoura de cana-de-açúcar e na usina, são produzidos 9,2 litros de bioetanol. Quando é usado o milho, essa relação cai para 1,4 litros de bioetanol para cada litro de combustível fóssil empregado no processo. O impacto ambiental também pode ser avaliado levando-se em conta a área de terra agricultável que deve ser usada. No Brasil, são produzidos 7500 litros de bioetanol por hectare de lavoura de cana-de-açúcar. No caso do milho, cada hectare produz menos da metade, apenas 3000 litros. Ou seja, a sustentabilidade nas duas rotas não pode ser considerada a mesma, apesar do biocombustível gerado e o consumo no carro serem iguais. Em outras palavras, a análise da pegada de carbono de uma determinada fonte de energia não é uma tarefa simples. Para se estimar a poluição gerada, deve ser feita uma análise de todas as etapas envolvidas na geração, transporte, armazenagem e uso da fonte energética, e não apenas da última etapa, quando ela é efetivamente usada. Essa análise é chamada de *Ciclo de Vida* e é uma tarefa árdua de ser feita e controversa, pois inúmeros fatores devem ser levados em conta para que seja obtida uma estimativa real do impacto ambiental da produção e uso de energia. O conhecimento do ciclo de vida de cada fonte energética é essencial para a tomada de decisão governamental quando se pretende substituir processos poluentes por mais limpos ou se planeja a implantação de novos sistemas de geração para atender à crescente demanda de energia pela sociedade.

12- Para onde vamos: a química e a futura matriz energética mundial

A dependência do *Homo sapiens* por energia está intimamente ligada à sua evolução. Os avanços tecnológicos, que definiram a nossa sociedade atual, aumentaram gradualmente o consumo de energia, que continua avançando anualmente em um ritmo proporcional às novas descobertas e invenções. Imagine o caos que seria uma cidade moderna sem fontes de energia! Não haveria combustíveis para transportar as pessoas em automóveis, ônibus ou metrô, faltaria o gás para cozinhar e eletricidade para movimentar elevadores, acender luzes e manter celulares e demais equipamentos eletro/eletrônicos funcionando.

Apesar do conforto que o uso intensivo de energia traz para o ser humano, esse uso pode em breve tornar insustentável a vida na Terra. O consumo de combustíveis fósseis, além da possibilidade iminente de esgotamento das reservas, tem aumentado a quantidade de gases do “efeito estufa” e provocado uma mudança climática que está afetando o planeta em sua totalidade. Diminuir o uso de energia parece uma realidade distante da sociedade moderna, pois implicaria mudanças radicais da nossa atual forma de viver. Assim, considerando o cenário atual, existem duas alternativas de resposta

das sociedades aos desafios das mudanças climáticas globais: reduzir as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera (mitigação) ou se adaptar aos impactos das mudanças climáticas (adaptação). Na via da mitigação, a alternativa que se coloca é diversificar a nossa matriz energética, optando por soluções menos poluentes e mais sustentáveis.

Como já mencionado, ocorreram diversas conferências nas últimas décadas que discutiram e estabeleceram metas para que os países diminuam a emissão de gases do efeito estufa ou, como falado coloquialmente, minimizem a pegada de carbono que o ser humano está deixando no planeta. Todos concordam em substituir os combustíveis fósseis por soluções renováveis, como o uso de energias provenientes dos raios solares, dos ventos, dos rios e da biomassa. Apesar de não haver dúvidas da necessidade dessa mudança, fatores econômicos e geopolíticos muitas vezes se sobrepõem à necessidade urgente de se alcançar um consumo energético mais consciente e mais limpo. Por essa razão, os governantes mundiais são reticentes em firmar e, mais importante, em cumprir acordos para alterar a matriz energética mundial.

No entanto, ao observar a evolução da matriz energética mundial se vê uma clara tendência no sentido de torná-la mais sustentável. Na **Figura 9a**, pode-se observar uma constante diminuição da participação do petróleo e carvão mineral na matriz energética mundial, e um aumento do uso de formas menos

poluentes, como o gás natural, ou dos renováveis, como eólica, solar e biomassa. Esta realidade é ainda mais expressiva na matriz energética brasileira em que fontes sustentáveis, como os biocombustíveis, a queima de lenha e carvão vegetal e a hidroeletricidade, representam importantes fatias do mercado de energia, como mostra a **Figura 9b**. Para ter-se uma ideia, enquanto no mundo cerca de 80% da energia é obtida pela queima de combustíveis fósseis, no Brasil eles representam pouco mais de 50% do mercado energético.

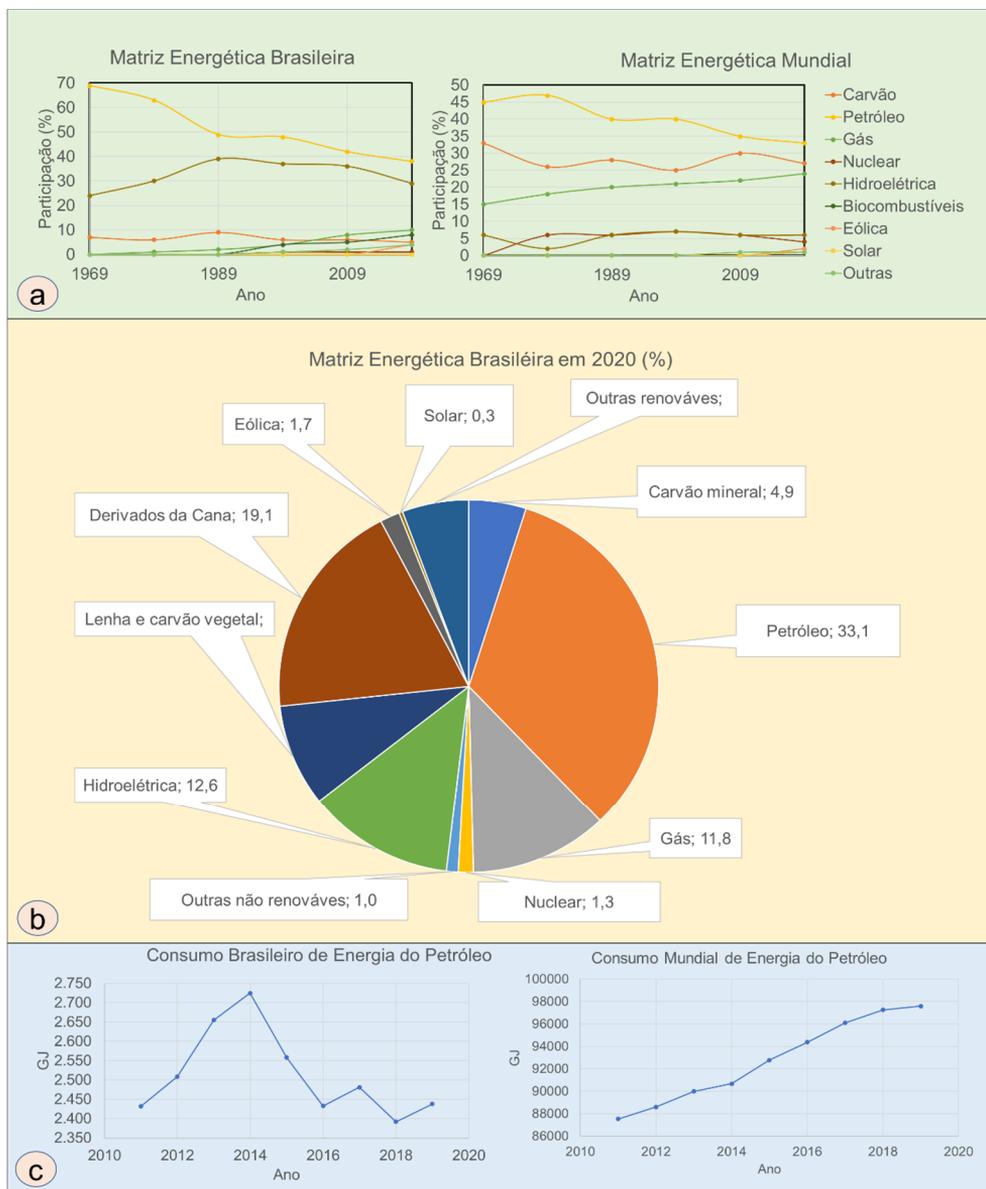


Figura 9. Consumo brasileiro e mundial de energia: (a) evolução da matriz energética por fonte de energia entre 1969 e 2019; (b) matriz energética brasileira em 2020; e (c) evolução do consumo total de petróleo e derivados.

No entanto, só melhorar o perfil da matriz energética não é suficiente para diminuir a pegada de carbono da atividade humana. O aumento constante no consumo total de energia faz com que, mesmo diminuindo o percentual do mercado, o mundo consuma cada vez mais combustíveis fósseis, como mostrado para o consumo mundial total de petróleo e derivados na **Figura 9c**. Essa não é a realidade do Brasil, pois graças à introdução do uso intensivo de álcool, carvão vegetal, lenha, bagaços, biodiesel e instalações de usinas eólicas e solares nas últimas décadas, as fontes fósseis são cada vez menos importantes mesmo com aumento de consumo total de energia, como evidencia a **Figura 9c** para o caso do petróleo e derivados.

A melhoria de processos químicos para a transformação de biomassa e o desenvolvimento de novos materiais para otimizar o uso energético do vento, do sol e dos rios, são fundamentais para o desenvolvimento sustentável da sociedade humana. A contribuição da química, muitas vezes tida como vilã do meio ambiente, é fundamental para se conseguir alcançar uma matriz energética menos poluente e que não comprometa o futuro do planeta, das formas de vida que existem na Terra e da sobrevivência do ser humano.

Bibliografia

BP Company. Statistical Review of World Energy 2021 - 70th edition, 2021. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>. Acesso: 03 fev. 2022.

COSTA, B. E. B.; CRUZ R. S.; RANGEL F. C.; MENEGHETTI S. M. P. Comparação entre hidrólise química e enzimática da biomassa lignocelulósica para produção de bioetanol: uma revisão. Rev. Virtual Quim., v. 13, n. 1, p. 242-259, 2021.

Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional 2021, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso: 03 fev. 2022.

MISHNAEVSKY Jr. L. et al. Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. Materials, v. 10, n. 1285, p. 1 - 24. 2017.

PINHO, D. M. M.; SUAREZ, P. A. Z. Óleo de amendoim ao biodiesel- histórico e política brasileira para o uso energético de óleos e gorduras. Rev. Virtual Quim., v. 9, n. 1, p. 39-51, 2017.

RAMALHO H. F.; SUAREZ, P.A.Z. A química dos óleos e gorduras e seus processos de extração e refino. Rev. Virtual Quim., v. 5, n. 1, p. 2-15, 2013.

SANTOS, M. C.; ALBUQUERQUE A. A.; SOLETTI J. I.; MENEGHETTI S. M. P. Principais tecnologias para produção de etanol anidro no Brasil, Rev. Virtual Quim., v. 13, n. 6, p. 1228-1240, 2021.

SUAREZ P. A. Z.; SANTOS A. L. F., RODRIGUES J. P.; ALVES M. B. Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los. Quim. Nova, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 768-775, 2009.

SUAREZ, P.A.Z.; MARTINS, G. B. C.; MELLO, V. M. Processos térmicos em óleos e gorduras. Rev. Virtual Quim., v. 5, n. 1, p. 16-25, 2013.

SUAREZ, P.A.Z.; MENEGHETTI S. M. P. 70º Aniversário do biodiesel em 2007: evolução histórica e situação atual no Brasil, Quim. Nova, v. 30, n. 8, p. 2068-2071, 2007.

The World Bank Group. Atlas eólico global, 2022. Disponível em: <https://globalwindatlas.info/>. Acesso: 03 fev. 2022.

The World Bank Group. Atlas solarimétrico global, 2022. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/>. Acesso: 03 fev. 2022.

WRANGHAM, R. Pegando fogo: por que cozinhar nos tornou humanos. 1. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2010, 226 p.



Uma produção SBQ - Sociedade Brasileira de Química

www.sbq.org.br