



NAPI
Energia
Zero-Carbono

ENERGIAS ZERO CARBONO



NAPI EZC
E-book - 1ª edição

ENERGIAS ZERO CARBONO

1º edição
2024

Novos Arranjos de Pesquisa e Inovação – Fundação Araucária



NAPI-EZC

Projeto financiado pela Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná – PI 05/2023 NAPI EZC

Com um foco especial na utilização inteligente e autogerada de energia, estamos abrindo caminho para um futuro mais sustentável.

Autores por ordem alfabética:

Alexandre Urbano
Cleber Santiago Alves
Diogo Zampieri Montanher
Eduardo Augusto Castelli Astrath
Flávio Clareth Colman
Gustavo Sanguino Dias
Ivair Aparecido dos Santos
Luiz Fernando Cótica
Luiz Gustavo Davanse da Silveira
Valdirlei Fernandes Freitas

Prefácio:

| José Antônio Eiras

Diagramação:

| Viviane Guimarães



ENERGIAS ZERO CARBONO

1º edição
2024



NAPI-EZC

Projeto financiado pela Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná – PI 05/2023 NAPI EZC

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Energias zero carbono [livro eletrônico]. -- 1.
ed. -- Maringá, PR : Ed. dos Autores, 2024.
PDF

Vários autores.
Bibliografia.
ISBN 978-65-01-17146-3

1. Dióxido de carbono atmosférico 2. Dióxido de carbono - Aspectos ambientais - Brasil 3. Energia - Fontes alternativas - Aspectos econômicos 4. Fontes energéticas renováveis 5. Meio ambiente - Aspectos sociais 6. Sustentabilidade ambiental.

24-230204

CDD-304.2

Índices para catálogo sistemático:

1. Fontes energéticas renováveis : Sustentabilidade ambiental : Ecologia 304.2

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

ISBN: 978-65-01-17146-3

CRB



9 786501 171463



PREFÁCIO

Por que a necessidade premente de promover uma transição energética global?

Este livro resulta de uma longa e constante motivação de um grupo pesquisadores, de algumas instituições de ensino e pesquisa do Paraná, vinculados ao **Napi EZC** (Novo Arranjo de Pesquisa e Inovação Energia Zero Carbono), para formar recursos humanos, incentivar o empreendedorismo, desenvolver, inovar e disseminar seus conhecimentos, avanços e oportunidades de cooperação científica e tecnológica.

Apesar da atualidade e importância da necessidade de uma transição energética global, bastante discutida e divulgada sob perspectivas econômicas e climáticas, percebeu-se que há escassas fontes informativas correlacionando fundamentos científicos, técnicas e métodos experimentais para conversão de energias renováveis e não poluentes.

Iniciando por uma apresentação concisa e objetiva do **Napi EZC**, o livro, nas cinco seções subsequentes, aborda de forma pormenorizada as principais causas que requerem a transição energética, o efeito estufa e o significado emissão zero carbono, opções de energias não poluentes disponíveis que estão sendo consideradas atualmente, fenômenos físicos que podem ser explorados para convertê-las em energia elétrica e, concluindo, opções para o armazenamento de energia elétrica para utilização posterior.



PREFÁCIO

Cada capítulo está elaborado para oferecer uma visão abrangente, atual e detalhada, ilustrada e cientificamente fundamentada, sobre fontes de emissão de carbono, fontes de geração e armazenamento de energias zero carbono, com o objetivo de introduzir o leitor na temática da transição energética universal em andamento. Cada capítulo, escrito em uma linguagem informativa e acessível também a não profissionais da área, pode ser lido de forma independente.

Espero que esta obra não apenas informe, mas também inspire o leitor a se aprofundar e contribuir, ativamente ou na disseminação deste tema, tão importante para a viabilização de um mundo mais sustentável.

Desejo a você, caro leitor, uma leitura enriquecedora e prazerosa.



José Antônio Eiras

Doutor em Física, Professor Titular da Universidade Federal de São Carlos, bolsista de Produtividade em Pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e coordenador do Instituto Nacional de Ciência Tecnologia e Inovação em Materiais Ferrosos para Conversores de Energia (INCT MatFerrce).



O NAPI EZC p. 07

- a. Introdução** p. 08
Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas
- b. Histórico** p. 09
Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas
- c. Missão** p. 10
Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas
- d. Produção e Microprodução autossustentável de energia elétrica** p. 11
Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas

A EMISSÃO MUNDIAL DE CARBONO p. 13

- a. Introdução** p. 14
Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas
- b. O Efeito Estufa** p. 18
Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas
- c. O Carbono** p. 21
Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas

ENERGIA ZERO CARBONO p. 39

- a. Zero Carbono: Emissão Nula** p. 40
Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas
- b. Carbono Zero: Mitigação** p. 42
Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas
- c. Pegada de Carbono** p. 43
Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas

FONTES DE ENERGIA ZERO CARBONO PARA AUTOGERAÇÃO p. 45

- a. Introdução** p. 46
Diogo Zampieri Montanher
- b. Piezoelétrica** p. 48
Diogo Zampieri Montanher
- c. Piroelétrica** p. 59
Diogo Zampieri Montanher
- d. Materiais i-Calóricos** p. 65
Cleber Santiago Alves e Flávio Clareth Colman
- e. Termoelétrica** p. 84
Luiz Gustavo Davanse da Silveira
- f. Triboelétrica** p. 109
Luiz Gustavo Davanse da Silveira



INDICE

FONTES DE ENERGIA ZERO CARBONO PARA GERAÇÃO EM LARGA ESCALA p. 138

| | |
|------------------------------------------------------------|--------|
| a. Introdução | p. 139 |
| Gustavo Sanguino Dias | |
| b. Energia Hidrelétrica | p. 146 |
| Luiz Fernando Cótica | |
| c. Energia Eólica | p. 159 |
| Luiz Fernando Cótica | |
| d. Energia Fotovoltaica (Solar) | p. 169 |
| Eduardo Augusto Castelli Astrath | |
| e. Energia Nuclear | p. 189 |
| Gustavo Sanguino Dias | |
| f. Energia Geotérmica | p. 214 |
| Eduardo Augusto Castelli Astrath e Ricardo Gouveia Teodoro | |

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA p. 224

| | |
|-----------------------------|--------|
| a. Introdução | p. 225 |
| Alexandre Urbano | |
| b. Pilhas e Baterias | p. 227 |
| Alexandre Urbano | |
| c. Supercapacitores | p. 236 |
| Ivair Aparecido dos Santos | |
| d. Hidrogênio Verde | p. 242 |
| Alexandre Urbano | |



NAPI
Energia
Zero-Carbono

CAPITULO 01

O NAPI E ZC



O NAPI EZC

a. Introdução

(Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas)

O **Novo Arranjo de Pesquisa e Inovação Energia Zero Carbono** (Napi EZC) reúne esforços e iniciativas de pesquisadores, estudantes de graduação e pós-graduação, pós-doutores e técnicos de seis universidades paranaenses, a saber:

Universidade Estadual de Maringá (UEM), Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Universidade Estadual de Londrina (UEL), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Câmpus de Guarapuava - PR, e Instituto Federal do Paraná (IFPR) - Câmpus de Paranavaí.

De fato, o **Napi EZC** constitui uma iniciativa inovadora em que **Universidades Públicas Paranaenses, Incubadoras de Empresas, Parques Tecnológicos Industriais e Empresas de Base Tecnológicas** estão unidas com o objetivo de promover o desenvolvimento de produtos e processos incorporando a **EZC** a fim de agregar valor, reduzir custos e gerar renda.



NAPI
Energia Zero-Carbono



Nesse arranjo, a pesquisa, o ensino e a extensão em temas de interesse do **Napi Ezc** estão voltados para o **Desenvolvimento Sustentável e uso de Energias Inteligentes** (Renováveis), assim como de criar e disseminar a cultura do Empreendedorismo Tecnológico dentro dessas Universidades paranaenses tomando como base o desenvolvimento de soluções em geração/conversão de energia e sua integração a soluções práticas relacionadas ao desenvolvimento de tecnologias e produtos inovadores por startups.

Pretende-se criar mecanismos de intensificação da relação universidade-empresa, de transferência de tecnologia e de estímulo à **inovação em Energia Zero Carbono** e uso racional de energia, além da formação de recursos humanos altamente qualificados e de forte viés empreendedor.



b. Histórico

(Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas)

O **Napi Ezc**, como concepção de projeto e iniciativa colaborativa, nasceu a partir da proposta de reunir, sob um mesmo guarda-chuva metodológico e conceitual, um conjunto de **pesquisadores paranaenses interessados ou que trabalham cotidianamente no tema Energia**, com especial ênfase ao estudo de fenômenos fundamentais e soluções tecnológicas em **Energias Renováveis e Uso Racional de Energia**.



Como o tema é amplo e comporta muitas formas de abordagem, optou-se por explorar temas relacionados principalmente com a **autogeração de energia**, focada na exploração de diferentes fenômenos físicos que permitem converter formas de energia diversas, como térmica ou solar, por exemplo, em energia elétrica.

A partir dessas definições, buscou-se, ainda em 2022, articular a participação de pesquisadores interessados no tema, distribuídos nas diferentes instituições paranaenses que, por fim, vieram a participar da proposta. **Ainda em 2022 o projeto foi submetido à avaliação técnica da Fundação Araucária, sendo finalmente aprovado em abril de 2023.**

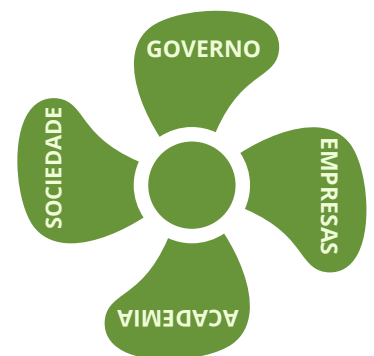
O lançamento oficial do Napi EZC ocorreu em agosto de 2023, na Universidade Estadual de Maringá. As atividades do projeto foram iniciadas, e seus impactos e resultados têm emergido desde então.



c. Missão

(Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas)

O **Napi EZC** tem como missão trabalhar para impulsionar a hélice quádrupla (governo, sociedade, empresas e academia) da sustentabilidade por meio de ações que congreguem ensino, pesquisa e extensão universitárias, aliadas à ações voltadas ao desenvolvimento tecnológico, à busca por inovação e ao incentivo ao empreendedorismo no meio acadêmico.



Para tanto, o Napi EZC tem procurado **concatenar e integrar** as ações de todos os seus participantes de forma a **maximizar os resultados e impactos da proposta**.

d. Produção e Microprodução autossustentável de energia elétrica

(Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas)

A **produção autossustentável de energia elétrica** está comumente relacionada às fontes de **energia consideradas independentes**, ou seja, aquelas que não dependem das distribuidoras de energia elétrica, presentes em todas as regiões do país.

São exemplos de **fontes alternativas** normalmente utilizadas para **geração autossustentável**:

- solar,
- eólica,
- hidroelétrica de pequena escala
- e biomassa (comumente encontradas em áreas rurais).

Essas fontes de geração de energia elétrica podem operar ligadas às distribuidoras de energia elétrica ou completamente isoladas.

Para que possam operar completamente independentes, podem ser utilizadas algumas formas de **armazenamento de energia**, como baterias.

Alguns sistemas comerciais já oferecem **soluções integradas para autogeração doméstica e armazenamento em baterias de lítio**, que tornam uma residência completamente independente da rede elétrica local.

Embora menos usuais, outras formas de armazenamento também são possíveis, como a **produção de hidrogênio a partir de fontes de energia elétrica e o armazenamento térmico**, na forma de calor, em água. Ambas as formas de armazenamento podem ser usadas como combustíveis, o hidrogênio em um automóvel, por exemplo, e a água aquecida em uma usina ou máquina térmica.



De fato, esse conceito, denominado **microprodução autossustentável**, refere-se à geração de eletricidade em escala muito reduzida, usualmente suficiente para alimentar dispositivos e aparelhos de baixo consumo energético.

Atualmente, este tipo de produção é comumente empregada para situações em que a conexão à rede elétrica convencional não é viável ou desejada, proporcionando independência e, na maioria dos casos, promovendo a sustentabilidade.

Porém, novos conceitos de tecnologias inteligentes, como **indústria 4.0 e internet das coisas**, os quais são desenvolvidos para tornarem-se completamente independentes, requerem também soluções independentes no que concerne à autogeração de energia.



Um exemplo dessas tecnologias, já empregadas em nosso dia a dia, são as **arandelas e lâmpadas de jardim**, as quais capturam energia da luz solar durante o dia para carregar uma bateria de lítio em seu interior. À noite, sensores crepusculares ou de presença ativam essas lâmpadas quando detectam baixa luminosidade ou movimentos próximos. Esse sistema é completamente independente e não requer nenhuma intervenção humana para seu completo funcionamento.



NAPI
Energia
Zero-Carbono

CAPITULO 02

A EMISSÃO MUNDIAL DE CARBONO



2. Emissão Mundial de Carbono

a. Introdução

(Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas)

As emissões de gases que promovem ou amplificam o **efeito estufa no planeta Terra** são consideradas, pelas principais agências científicas e pelos cientistas que investigam seus efeitos, o **principal motor das alterações climáticas** que temos observado nos últimos anos.



Entre os gases promotores do efeito estufa, os considerados mais nocivos são aqueles à base de carbono, como o **dióxido de carbono (CO₂)** e o **metano (CH₄)** [1].



Ambos os gases amplificam a absorção térmica na atmosfera, aumentam a temperatura da Terra e mudam a fauna do planeta, causando grandes desequilíbrios [1].

Neste contexto de mudanças climáticas drásticas e muito velozes, modelos matemáticos complexos, como o “**Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados**” - CMIP do inglês *Coupled Model Intercomparison Project* e o “**Intercomparação de Modelos de Ciclo de Carbono e Clima Acoplados: protocolo experimental para CMIP6**” - C4MIP do inglês *The Coupled Climate–Carbon Cycle Model Intercomparison Project: experimental protocol for CMIP6* [2], são necessários para alcançarmos a compreensão de tais fenômenos e para determinar possíveis linhas de abordagem de curto, médio e longo prazos.

Esses modelos são aplicados para investigar a relação das emissões com uma vasta gama de dados de mudanças climáticas de forma a correlacioná-los. Tal complexidade exige a **expertise de pesquisadores experientes no tema** e muito tempo de treinamento para obter-se habilidades específicas para operá-los e entendê-los.

Como resultado, análises cada vez mais precisas das **emissões de carbono**, correlacionadas às atividades humanas, e sua redistribuição e absorção por nossos oceanos e atmosfera são obtidas, guiando-nos para compor políticas públicas voltadas para o controle dessas emissões e para a prevenção de desequilíbrios maiores, **cujas consequências climáticas podem ser catastróficas** [3].

i. Histórico

Os níveis de carbono na atmosfera da Terra vêm aumentando ao longo das últimas décadas quando comparados a níveis pré-históricos, 800.000 anos atrás. Esse aumento está diretamente vinculado às atividades humanas.



Os dados que remontam as taxas de carbono da era pré-histórica são coletados por medidas indiretas em blocos de gelo desenterrados dos locais mais frios do planeta e compilados pela **equipe do Clima-Change** [4], uma **equipe da NASA-Administração Nacional Aeronáutica e Espacial** (*National Aeronautics and Space Administration*) que monitora as alterações climáticas.

O gráfico ilustrado na **Figura 1** revela as taxas de dióxido de carbono (CO₂), contidas na atmosfera terrestre nos últimos 800.000 anos.

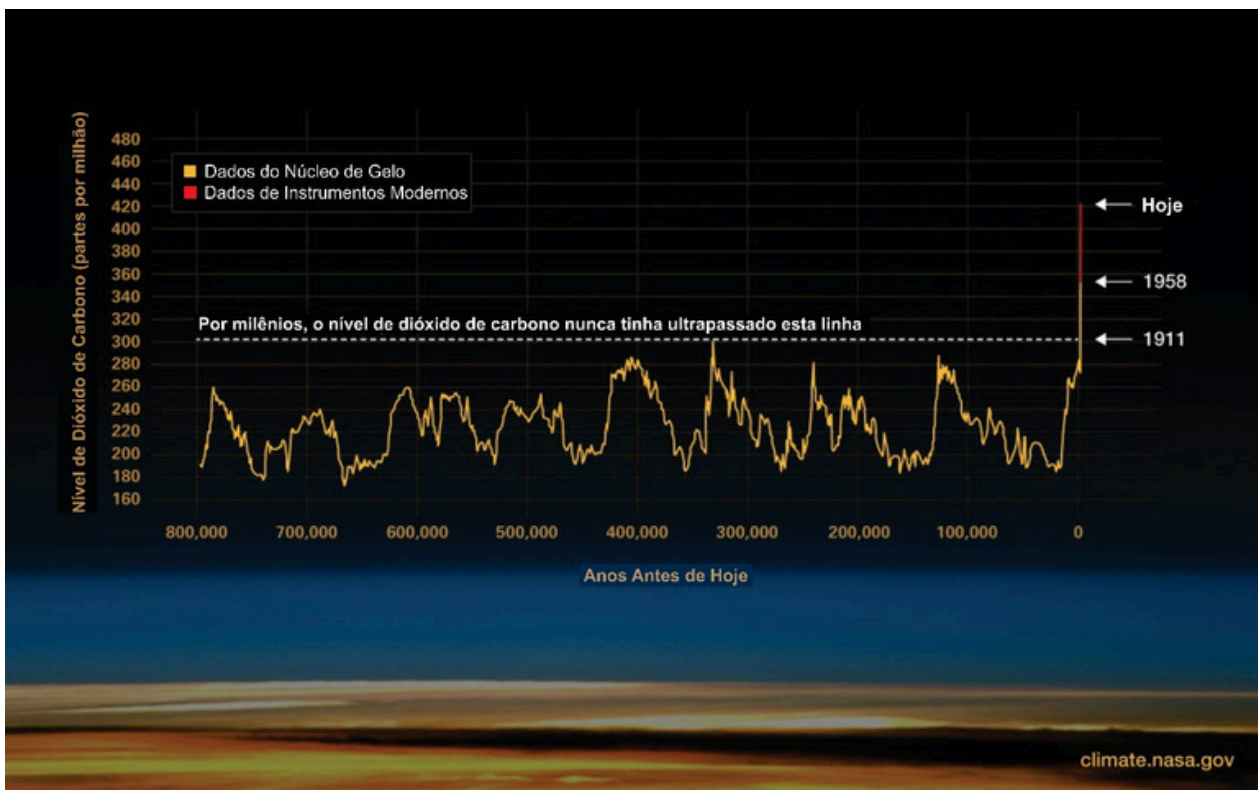


Figura 1 - Comparação de amostras atmosféricas contidas em núcleos de gelo e medições diretas mais recentes. (Fonte: <https://science.nasa.gov/climate-change/evidence/>).

Esses dados, medidos em partes por milhão, indicam crescimento de taxas medianas de aproximadamente 220 ppm antes de 1911 para 420 ppm nos tempos atuais. **É possível notar até 8 ciclos de crescimento com seguidas reduções da quantidade de CO₂ na atmosfera terrestre.**

Esses ciclos são vinculados às 8 eras glaciais observadas pelo estudo do gelo em alguns pontos do planeta. Porém, um **ciclo de crescimento de CO₂ na atmosfera muitíssimo acentuado se inicia no ano de 1911**, ultrapassando a linha pontilhada que delimita a maior taxa medida anteriormente e se acentua em 1958 (período pós segunda guerra mundial) atingindo valores elevados em um ritmo de crescimento nunca observado anteriormente.

A NASA considera essas medidas, em conjunto com uma série de outros estudos, como **evidências inequívocas de que a atmosfera do planeta está aquecendo a um ritmo nunca observado anteriormente, e atribui esse crescimento às atividades humanas.**



Na história recente, a **revolução industrial**, período referente às últimas décadas do século XVIII até as duas décadas iniciais do século XIX, a qual ficou marcada pela transição dos processos de fabricação com o advento das máquinas à vapor, iniciaram o **período de aumento nas taxas de carbono presentes na atmosfera terrestre.**

Mas foi o período subsequente ao **fim da segunda guerra mundial**, período em que os processos de produção industrial foram retomados e intensificados, que é considerado o **marco do aumento volumoso das emissões de carbono na atmosfera terrestre.**

Hoje em dia, com os modernos sistemas de monitoramento por sensores de última geração, as agências de monitoramento mais respeitadas do mundo **indicam crescimento acentuado nas taxas de carbono da atmosfera e atribuem a isso o aquecimento global e desequilíbrios climáticos.**

ii. Ciclo do Carbono e Efeito Estufa

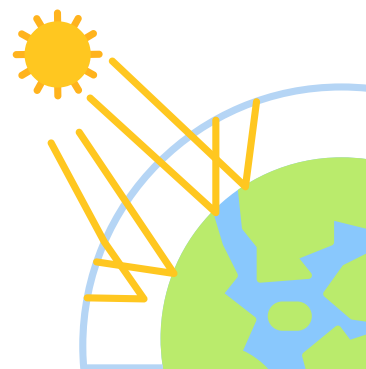
O **carbono** é o elemento químico básico para a vida orgânica como a conhecemos, pois é ele que, combinado com outros elementos químicos, forma as mais diversas estruturas moleculares que integra todas as formas de vida orgânica conhecidas, tais como: seres humanos e outros animais, plantas, microrganismos etc.

Ele também é responsável por outros aspectos necessários à vida no planeta terra, como por exemplo, o efeito estufa, o qual mantém as condições de temperatura no planeta ideais, tornando-o habitável [5].

b. O Efeito Estufa

(Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas)

O **efeito estufa** (EE) é um dos processos que ocorrem na atmosfera terrestre que **permite a existência da vida orgânica** como a conhecemos. Este efeito é o principal agente responsável por **manter a temperatura do planeta em faixas termicamente viáveis para a vida terrestre**.



O EE é promovido por meio de alguns dos gases presentes na atmosfera, dos quais os principais são o **dióxido de carbono**, o **metano**, o **vapor de água**, entre outros. Esses gases vêm operando em um delicado equilíbrio ao longo dos séculos **mantendo a temperatura do planeta em faixas ideais para a existência e manutenção da vida na Terra** [6].

i. Atmosfera terrestre

A **atmosfera da Terra** é a porção gasosa aprisionada pela força da gravidade terrestre, subdividida em várias camadas que circundam nosso planeta e cuja primeira camada (troposfera) possui uma espessura de ~ 8 a 12 km. Ela é composta principalmente por:

- Nitrogênio – N₂ (78,08 %);
- Oxigênio - O₂ (20,95 %);
- vapor de Água – H₂ (pouco menos de 1 %).

Além disso, outros gases estão presentes em menor quantidade, a saber:

- Argônio – Ar (9340 ppm);
- Dióxido de carbono – CO₂ (400 ppm);
- Neônio – Ne (18,18 ppm);
- Hélio – He (5,24 ppm);
- Metano - CH₄ (1,7 ppm);
- Criptônio – Kr (1,14 ppm);
- Hidrogênio – H₂ (0,55 ppm).



Os **gases atmosféricos** que promovem o EE são, usualmente, gases que formam moléculas poliatômicos mais complexas que as do oxigênio e nitrogênio. Os **principais gases, considerados agentes do EE**, são: **dióxido de carbono, vapor de água e metano.** Esses gases absorvem a energia solar irradiada/refletida pela superfície da Terra, mantendo a energia térmica próxima a superfície do planeta e aquecendo-o [7].

ii. O Efeito Estufa



Simplificadamente, o **EE se inicia quando a radiação solar atinge as superfície estratosférica do planeta** (~30 km). Essas superfícies, formadas em parte por moléculas de oxigênio mais pesadas (denominado ozônio - O₃), absorvem parte da radiação solar, como a ultravioleta do tipo B (UV-B), diminuindo sua incidência sobre a superfície terrestre.

Por efeitos quânticos, **parte dessa radiação é absorvida pelo planeta**, e tudo que nele habita, e uma outra parte é espalhada ou “refletida” pela superfície e atmosfera terrestre.

Uma porção dessa radiação é absorvida pelos gases mais complexos da atmosfera terrestre (CO₂, CH₄ e H₂O) e transformada em **vibrações interatômicas**.

Esse processo, chamado de **efeito estufa**, mantém a energia absorvida do sol próximo a superfície do planeta, aquecendo-o até as temperaturas em que estamos “acostumados” a

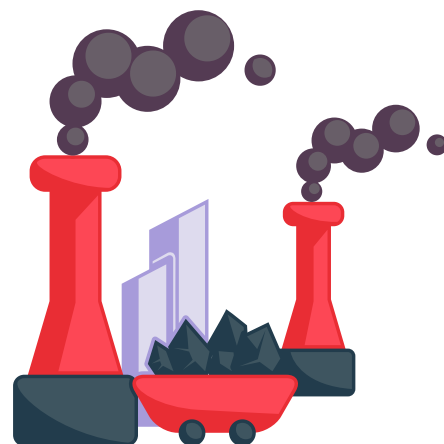


viver. Estima-se que **sem esse efeito a temperatura média do planeta diminuiria em 33 °C**, inviabilizando a vida orgânica na Terra [6].

iii. Equilíbrio

O EE vem ocorrendo em um delicado equilíbrio ao longo dos séculos. Entre os principais gases promotores do efeito estufa, o que tem sofrido maiores variações na concentração nos últimos anos é o CO₂.

Isso é devido, principalmente, à **queima de combustíveis fósseis** usados como fontes de energia em diferentes processos da vida cotidiana humana. Conseqüentemente, o aumento da **concentração de CO₂ na atmosfera da Terra intensifica o efeito estufa**, promovendo o aumento da temperatura média do planeta.



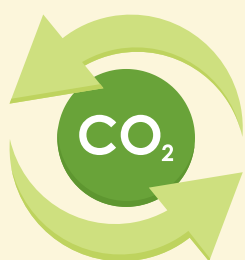
Esse aumento de temperatura é nocivo ao planeta e traz desequilíbrio para os diversos processos necessários à vida, tornando-a impossível como a conhecemos.

De fato, estima-se que um **aumento de temperatura de 1 grau tem o potencial de extinguir aproximadamente 100 mil espécies da fauna terrestre**. Isso ocorre porque o aumento da temperatura média da Terra muda o equilíbrio do ciclo do carbono, impedindo que o planeta absorva mais carbono, aumentando ainda mais o aquecimento. Esse ciclo, tão vital ao planeta, será discutido mais adiante [8].

c. O Carbono

(Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas)

Existem indícios científicos que permitem inferir que o carbono do Universo é oriundo de processos estelares decorrentes na origem do próprio Universo.



O carbono é o quarto elemento mais abundante do Universo, atrás somente de hidrogênio, hélio e oxigênio. Estima-se que na Terra exista cerca de 65.500 bilhões de toneladas métricas (65.500 Giga-Toneladas métricas) de carbono.

O **armazenamento do carbono no planeta Terra** ocorre principalmente nas **rochas e oceanos profundos**, mas também se deposita **carbono na atmosfera e na biomassa**. Entre esses depósitos de carbono ocorre uma troca constante e, em equilíbrio, mantém as condições ideais para que a vida orgânica prolifere no planeta, chamado de ciclo do carbono [5].

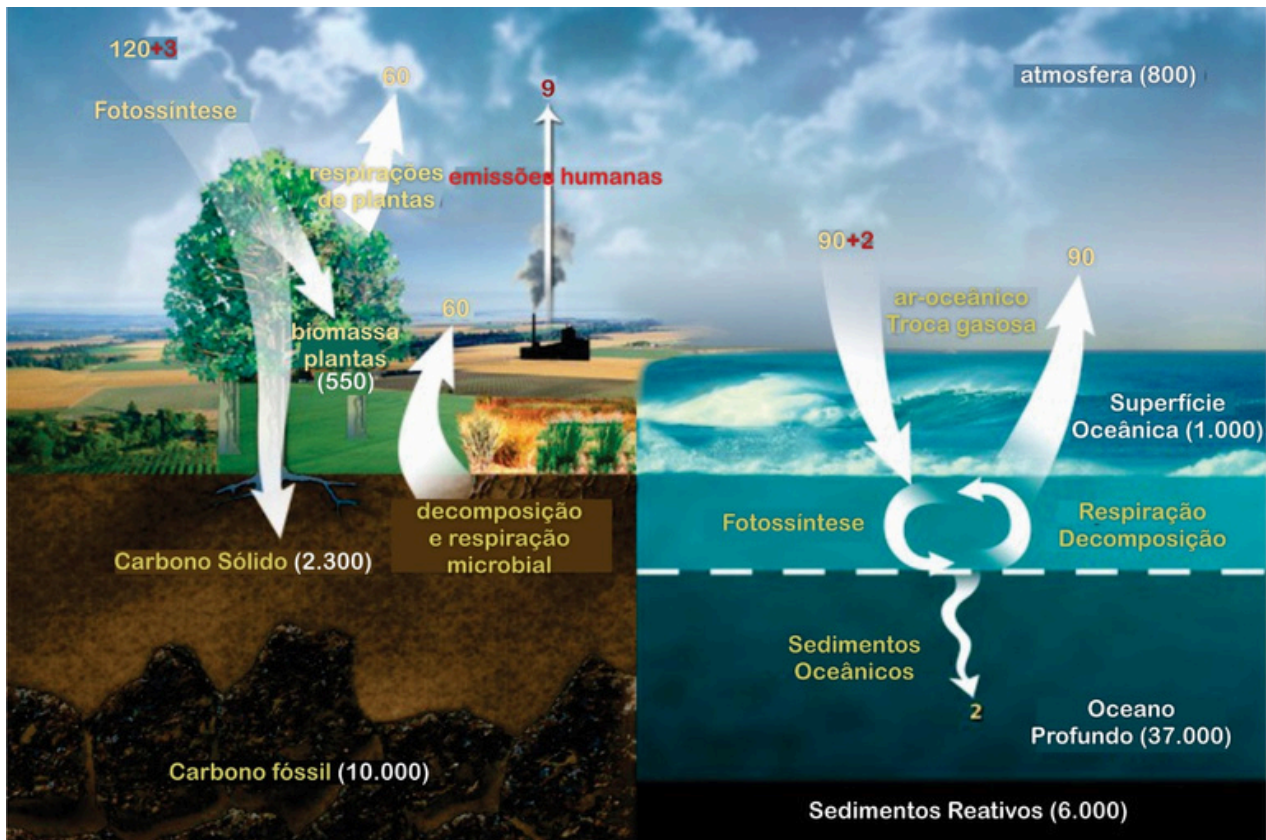


Figura 2 - Este diagrama do ciclo rápido do carbono ilustra o movimento do carbono entre a terra, a atmosfera e os oceanos. Os números em amarelo representam os fluxos naturais, enquanto os em vermelho indicam as contribuições humanas, expressas em gigatoneladas de carbono por ano. Os números em branco mostram a quantidade de carbono armazenada. (NASA. The Carbon Cycle. Earth Observatory, 2021)

O carbono desempenha um papel essencial na biologia devido à sua **capacidade de formar muitas ligações** — até quatro por átomo — em uma variedade aparentemente infinita de moléculas orgânicas complexas.

Muitas moléculas orgânicas contêm átomos de carbono que formam fortes ligações com outros átomos de carbono, combinando-se em longas cadeias ou anéis.

Essas **cadeias e anéis de carbono** são a base das células vivas. Por exemplo, o DNA é feito de duas moléculas entrelaçadas construídas em torno de uma cadeia de carbono.



As ligações nas longas cadeias de carbono contêm muita energia. **Quando as cadeias se rompem, a energia armazenada é liberada.** Essa energia torna as moléculas de carbono uma excelente fonte de combustível para todos os seres vivos.

i. O Ciclo do Carbono

As trocas entre os reservatórios de carbono ocorrem constantemente no planeta. Elas possuem mecanismos considerados “lentos”, como os processos geoquímicos, por exemplo, que ocorrem em tempos que podem se estender por dezenas de milhares de anos.

Já os que ocorrem em ciclos considerados “rápidos” são principalmente decorrentes dos ciclos de vida orgânica no planeta, que se desenvolvem em algumas dezenas de anos.

Podemos apontar, ainda, uma “físico-química planetária” que regula a dança entre oceano, Terra e atmosfera no decorrer do ciclo do carbono. Se o **dióxido de carbono** sobe para a atmosfera por causa de um **aumento na atividade vulcânica**, por exemplo, as **temperaturas sobem**, levando a mais **chuvas**, que dissolvem mais rochas, criando mais íons que eventualmente depositarão mais carbono no fundo do oceano.



Essa dinâmica, que também é muito lenta, usualmente leva algumas **centenas de milhares de anos para reequilibrar o lento ciclo do carbono** decorrente do intemperismo químico.

Ciclos lentos

Intemperismo Químico

Em contato com a água, proveniente das chuvas, **o carbono da atmosfera se combina e se torna ácido carbônico “fraco”** (daí a origem do termo “chuva ácida”). Esse ácido, em contato com o solo, dissolve as rochas por meio do chamado **“intemperismo químico”**, liberando sódio, potássio, magnésio, cálcio, entre outros.

Os rios, por sua vez, carregam esses elementos químicos para os oceanos, os quais se recombinaem com elementos existentes nesses oceanos para formar, entre outros, o **carbonato de cálcio**. Organismos vivos contidos no oceano utilizam esse composto para suas próprias estruturas, tais como moluscos e corais.

Após o ciclo de vida desses animais esse material é sedimentado no fundo do oceano e se transforma em rochas calcárias, que armazenam grandes quantidades de carbono.



Uma outra forma de armazenamento oriundo de vida orgânica é quando esses seres morrem e seus organismos se depositam em diferentes ambientes terrestre, os quais, devido a ação de calor e pressões ao longo do tempo, podem se transformar em **rochas sedimentares** ou, dependendo do processo, se transformar em **óleo ou gás**, como o **gás de xisto**.



O retorno desse carbono “estocado” para a atmosfera, dentro do **ciclo lento**, ocorre devido a ações de vulcões, os quais, devido a um processo geológico específico, comprime, liquefaz e recombina porções de rochas formando outros minerais e liberando dióxido de carbono na atmosfera.



Por fim, os vulcões recobrem a Terra com rochas ricas em silicatos e um novo ciclo se inicia. **Atualmente, estima-se que há cerca de 1500 vulcões ativos em todo o planeta Terra [5].**

Superfícies Oceânicas

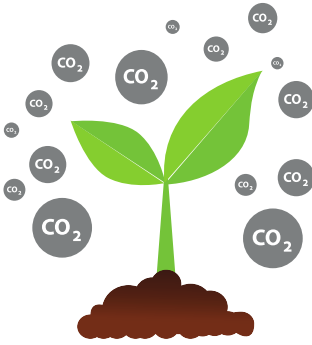
As **superfícies oceânicas** absorvem grandes quantidades de carbono por meio da fotossíntese de fitoplânctons e por reações químicas simples. **Fitoplânctons são microrganismos existentes nos oceanos capazes de efetuar fotossíntese.**

Já as reações químicas ocorrem porque o **dióxido de carbono** se dissolve quando entra em contato com a superfície dos oceanos, **criando ácido carbônico** como produto dessa reação. Em contrapartida, são liberados átomos de hidrogênio, que formam os hidrogeno-carbonatos (bicarbonatos), cuja liberação para a atmosfera é mais difícil. **A consequência de todo esse processo é a acidificação do oceano, pois essas reações reduzem o pH da água.**

Não obstante, as trocas gasosas entre as superfícies oceânicas e a atmosférica também liberam carbono para a atmosfera.

Isso ocorre principalmente devido a processos de difusão, algumas **atividades biológicas**, mudanças de temperatura e ao movimento das águas oceânicas profundas [9].

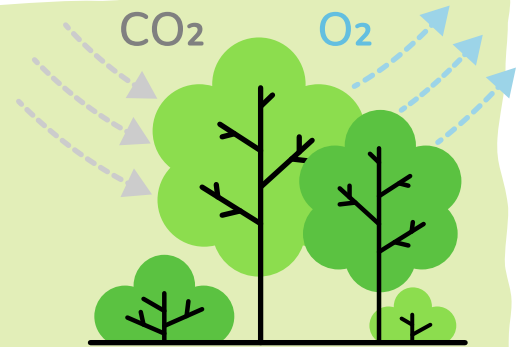
Ciclos rápidos



O **ciclo rápido do carbono** está intimamente ligado à vida orgânica existente no planeta Terra. Isso ocorre porque toda vida orgânica conhecida é baseada em carbono, consome carbono durante sua existência e troca carbono com a atmosfera.

Os principais agentes orgânicos do **ciclo rápido de carbono** são as **plantas e fitoplânctons** (existentes nos oceanos), que armazenam o dióxido de carbono retirado da atmosfera em suas células.

Todos esses agentes retiram energia do sol para combinar dióxido de carbono (atmosférico) e água em uma reação que produz açúcar e oxigênio. **Essa reação é conhecida como fotossíntese.**



O carbono então é armazenado como **açúcar** ($C_{12}H_{22}O_{11}$), o qual é utilizado por esses agentes para crescer. Outros agentes orgânicos, os animais e seres humanos, aderem ao ciclo do carbono quando comem essas plantas para obterem energia.

Ao fim, quando todos esses agentes morrem, **devolvem o carbono a atmosfera em processos de decomposição natural ou catalisados por fogo**. Nesse processo, o oxigênio atmosférico se recombina com o açúcar para liberar energia, água e dióxido de carbono para a atmosfera.

Na verdade, o ciclo rápido está tão intimamente ligado à vida orgânica do planeta que há uma variação da quantidade de dióxido de carbono na atmosfera durante as estações características do planeta Terra.

De fato, **boa parte das plantas morrem ou hibernam no inverno, decompondo-se no solo em contato com a atmosfera.** Nesta estação, ocorre um aumento nas concentrações de dióxido de carbono na atmosfera.

O inverso ocorre na primavera, quando as plantas florescem e a flora se regenera. Nessa estação, o crescimento das plantas **reduz a concentração de dióxido de carbono na atmosfera.**



Esse ciclo é tão impressionante que **parece que o planeta inteiro está respirando**, em um processo bem definido de inspiração e expiração, que perdura ao longo das estações do ano [5].

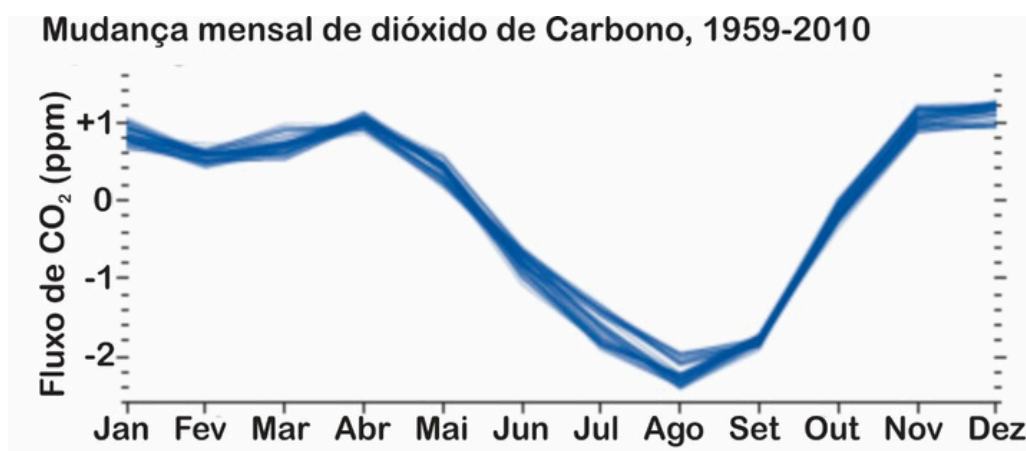


Figura 3 - Ciclo de carbono – mudança da concentração entre estações do ano. Fonte: NASA. Carbon cycle. Earth Observatory. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>.

Ao fim, quando todos esses agentes morrem, **devolvem o carbono a atmosfera em processos de decomposição natural ou catalisados por fogo**. Nesse processo, o oxigênio atmosférico se recombina com o açúcar para liberar energia, água e dióxido de carbono para a atmosfera.

ii. Malefícios ligados às alterações da concentração de CO₂ na atmosfera da Terra

Os **malefícios esperados** para as **variações nos níveis de CO₂ na atmosfera terrestre**, sejam para mais ou para menos, são as **mudanças climáticas** e com elas as consequências à vida orgânica no planeta.

Isso porque, como visto, o **ciclo de carbono** deveria se manter em equilíbrio para que as formas de vida orgânicas que conhecemos pudessem continuar a existir.

No entanto, muitos estudos contemporâneos indicam um **aumento da concentração de CO₂ na atmosfera da Terra**, cujas **consequências já são irreversíveis** e continuarão ao longo das próximas décadas, como o aumento da temperatura global observado nos últimos anos.



De fato, o **aumento do CO₂ atmosférico** promove aumento de intensidade do efeito estufa no planeta, cuja consequência mais imediata é o aumento da temperatura global.

Aumento do nível dos mares



O **aumento da temperatura média global** provoca o **derretimento do gelo** existente nos polos do planeta. A consequência é um inevitável aumento dos níveis de água dos oceanos.

Atualmente, já existem indícios de que os **níveis oceânicos já estão maiores**, cerca de 20 cm, e espera-se que atinja até 2 metros nas próximas décadas.

A consequência direta seria grandes perdas de áreas litorâneas, que são aquelas onde se encontra a grande maioria da população terrestre.

Furacões

Os **furacões, vendavais e outros eventos climáticos extremos** relacionados aos deslocamentos de grandes massas de ar se tornarão constantes, e se intensificarão em todo o planeta. **Vários desastres e riscos à vida humana vêm sendo relatados como consequência direta desses eventos.**

A própria infraestrutura arquitetônica das cidades vem sendo objeto de discussões quando se pensa em adaptações às novas condições climáticas extremas que iremos ou teremos que vivenciar.

Secas

Outros eventos climáticos bastante prejudiciais são as **secas prolongadas** e as **ondas de calor intensas e prolongadas**. Esses eventos comprometem as condições de vida de muitos ecossistemas e afetam diretamente a vida humana, principalmente provocando escassez de alimentos e água potável.



Incêndios

A **alta das temperaturas**, aliada à ocorrência de climas cada vez mais secos, propicia os eventos de **incêndios florestais**, que são cada vez mais intensos, extensos e duradouros.

Em virtude disso, enfrentamos diferentes consequências adversas e desastrosas, como a **perda da fauna e flora de importantes ecossistemas**.



Além disso, as queimadas promovem **aumento ainda maior dos níveis de carbono atmosférico**, além de reduzir suas funções como agentes de captura de CO₂.

Precipitações

Os desequilíbrios também afetam a **distribuição das precipitações**, com aumento intenso de chuvas em algumas regiões e longos períodos de estiagem em outras.

Esses eventos, quando muito extremos, também contribuem para **potencializar catástrofes**, como enchentes, inundações de grandes proporções etc.

Geadas

Alguns eventos climáticos podem estar **desaparecendo em regiões onde eles historicamente ocorreram**. Um exemplo desse tipo de evento são as **geadas**. Para a maioria das pessoas esse é um tipo de evento desagradável e dispensável.



Contudo, **períodos de geadas são importantíssimos para os ciclos de vida da fauna e flora** dessas regiões, contribuindo para o controle natural de pragas, por exemplo.


Efeitos a longo prazo

Todos os eventos climáticos citados acima serão intensificados com o passar do tempo e, em casos mais extremos, **tornarão parte do planeta inabitável e/ou inóspito à vida orgânica como a conhecemos.**

As temperaturas continuarão a subir e os ciclos de carbono serão cada vez mais prejudicados ou mesmo alterados, tornando as condições de vida no planeta cada vez mais difíceis.

iii. Níveis de emissão atuais

Os **níveis de emissões de carbono** no planeta vem **aumentando ao longo das últimas décadas** em um nível ao qual o planeta por si só não consegue absorver, ao menos não em um curto período de tempo.



De fato, é previsto que ao longo de centenas de anos o planeta deva absorver todo esse carbono já emitido até o momento. Porém, esse tempo é demasiado longo para a vida orgânica no planeta suportar tais alterações climáticas. Por isso, é preciso reduzir as emissões de carbono imediatamente para começarmos a mitigar seus efeitos.

Isso porque, em **eras pré-revolução industrial as emissões de CO₂**, por exemplo, encontravam-se abaixo das 200 milhões de toneladas/ano. Hoje em dia, esses números aumentaram exponencialmente e **já atingem cerca de 35 bilhões de toneladas/ano**, fazendo aumentar a concentração de CO₂ na atmosfera de forma alcançar números nunca antes vistos [1].

Toda essa emissão **elevou os níveis de dióxido de carbono na atmosfera terrestre**, saindo de menos de 280 partes por milhão (antes de 1900) para as atuais 420 partes por milhão [4].

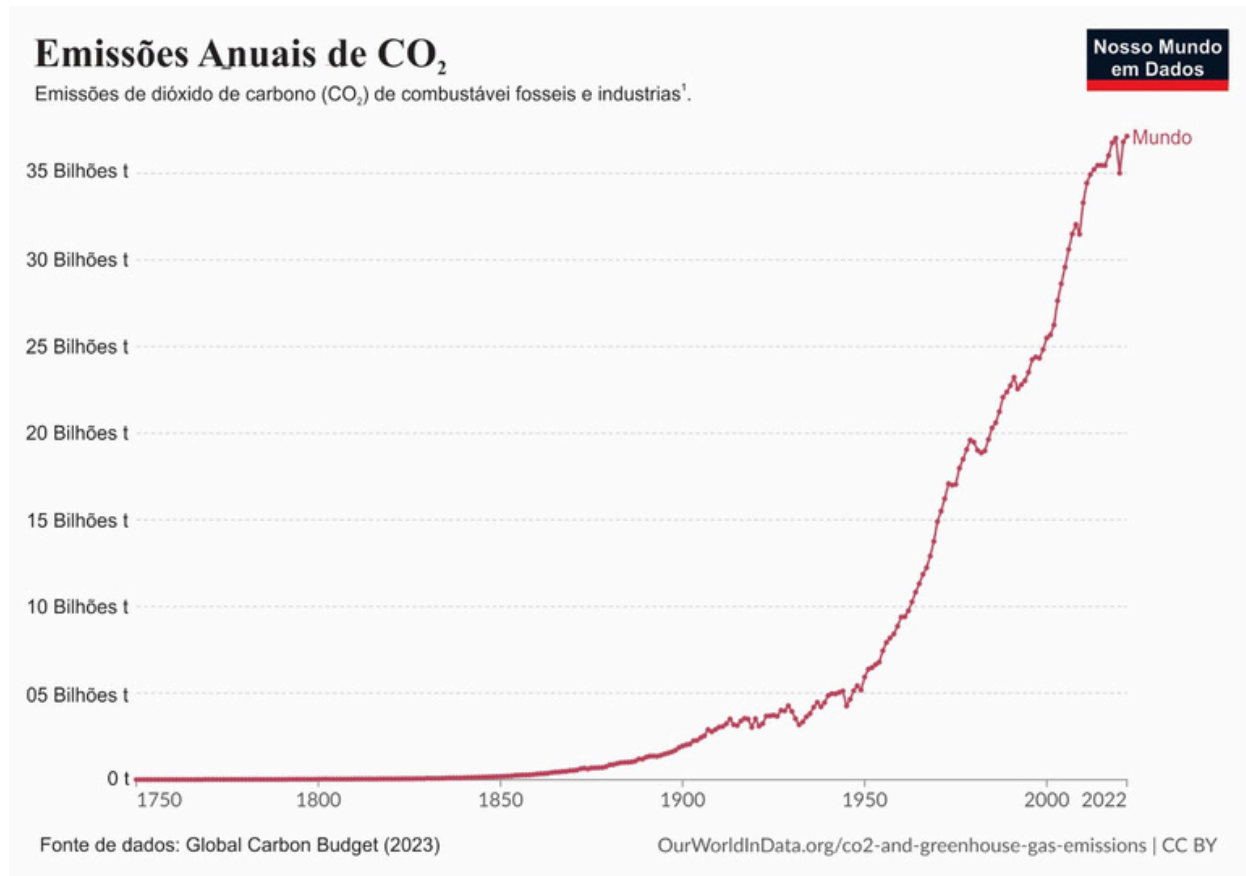


Figura 4 - Emissões anuais de CO₂ no planeta terra nos últimos 3 séculos.
Fonte: NASA. Evidence: climate change. Science [4].

As distribuições das emissões de CO₂ no planeta não são homogêneas e se concentram em regiões distintas.

Atualmente, a China e o restante da Ásia são os que mais emitem carbono no mundo, seguidos por EUA, Índia e União Europeia.

O **Brasil, incluído a América do Sul como um todo, aparece em nono**, de uma divisão de 12 regiões, como região que mais emite CO₂ na atmosfera terrestre.



Apesar de aparentemente **China e restante da Ásia** aparecerem como os principais vilões no quesito emissões de carbono, essa região é o lar de quase 60% da população mundial e, em números por habitante, as emissões nessa região são inferiores à média mundial.

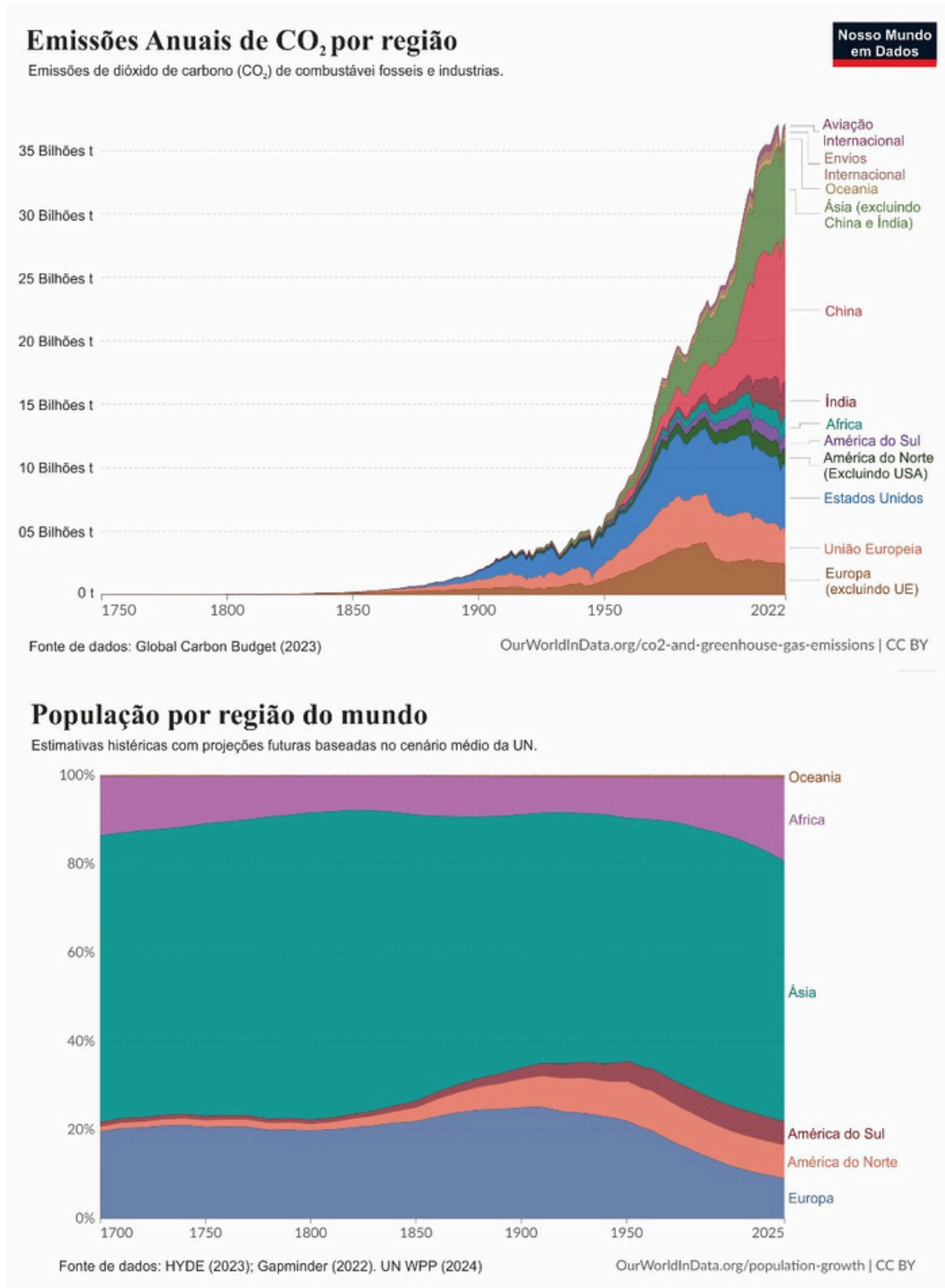
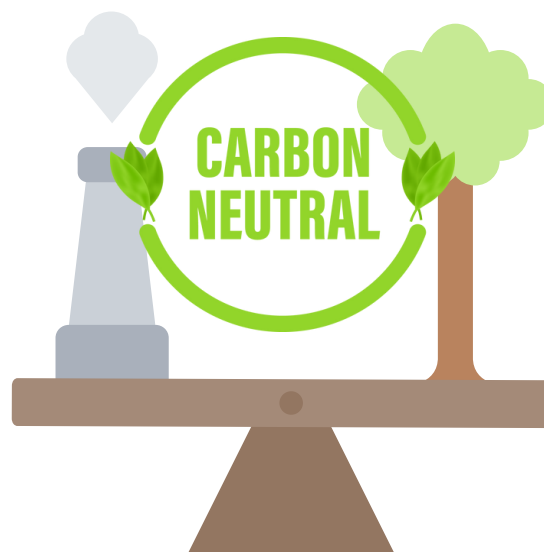


Figura 5 - Emissões regionais de CO₂ e dados demográficos mundiais.
Fontes: UR WORLD IN DATA. CO₂ emissions.[1] [10]

iv. Neutralidade do carbono

Neutralidade de carbono é o termo cunhado para indicar um estado de emissões líquidas nulas, ou seja, um estado no qual a **soma de todas as emissões de carbono deve ser equivalente à capacidade do planeta de retirar ou absorver esse carbono.**



Desta forma, todos os acordos para a busca da neutralidade nas emissões de carbono passam diretamente pela redução dessas emissões.

Neste caminho, a **indústria da energia**, que figura entre **principais agentes emissores de carbono da atmosfera** da Terra, deve passar por profundas alterações, posto que grande parte da energia consumida no mundo decorre da queima de combustíveis fósseis.



Portanto, o caminho para promover sólidas reduções nas emissões de carbono (e demais gases de efeito estufa), com vistas à alcançarmos a neutralidade, está na busca por processos que permitam o uso de energias renováveis, como apontado no **quarto relatório de avaliação do IPCC (AR4)** [11].

Para criar abordagens eficazes na redução das emissões de CO₂, a **identidade Kaya** (equação matemática criada para quantificar as emissões de carbono) pode ser aplicada para dividir as emissões de CO₂ relacionadas à energia em quatro fatores principais:

- ▶ 1) a população,
- ▶ 2) o produto interno bruto (PIB) per capita,
- ▶ 3) a intensidade energética (definida como o fornecimento total de energia primária (TPES) por unidade de PIB) e
- ▶ 4) a intensidade de carbono (emissões de CO₂ por TPES).

A equação que permite calcular as emissões de CO₂ é:

$$\text{Emissões de CO}_2 = \text{População} \times (\text{PIB/população}) \times (\text{TPES/PIB}) \times (\text{CO}_2/\text{TPES}).$$

No **AR4** (relatório de avaliação do IPCC), foram sugeridas várias formas de **reduzir as emissões de gases** que retêm calor quando do fornecimento de energia, a saber:

01 Aumentar a eficiência na produção, transmissão e distribuição de energia, incluindo a cogeração de calor e eletricidade.

02 Melhorar a eficiência do uso de energia em diferentes setores e aplicações, como em edifícios, indústrias, agricultura, transporte, aquecimento, resfriamento e iluminação.

03

Substituir fontes de energia com alta emissão de gases de efeito estufa (GEE), como carvão e petróleo, por fontes com menores emissões de GEE, como gás natural, energia nuclear e fontes renováveis.

04

Implementar tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) para evitar que o CO₂ gerado pela combustão ou processos industriais seja liberado na atmosfera. A CCS também pode remover CO₂ da atmosfera quando usada em processos como a combustão ou fermentação de biomassa.

05

Promover mudanças nos padrões de consumo para um uso mais eficiente da energia ou para a redução do consumo de produtos e serviços que demandam muita energia e geram altas emissões de carbono.

As **ER** (Energias Renováveis) são derivadas de **fontes solares, geofísicas ou biológicas** que são reabastecidas naturalmente a uma taxa igual ou superior àquela em que são consumidas.

Elas provêm de **fluxos contínuos ou cíclicos** de energia presentes no ambiente natural, incluindo recursos como **biomassa, energia solar, calor geotérmico, energia hidrelétrica, energia das marés e ondas, energia térmica oceânica e energia eólica.**

No entanto, há um risco de **superexploração**, como no caso da biomassa sendo utilizada mais rapidamente do que pode se regenerar ou do calor geotérmico sendo extraído a uma taxa superior à de sua reposição.



Como as pessoas demandam **serviços energéticos**, e não apenas energia em si, é crucial que esses serviços sejam fornecidos de maneira **eficiente**, utilizando menos energia primária por meio de **tecnologias de baixo carbono** que ajudem a **reduzir as emissões de CO₂** [12].

Ainda há necessidade de expandir o conhecimento em várias áreas ligadas às **energias renováveis** (ER) e seu papel na **redução das emissões de GEE**, a saber [1. 8]:

1. O custo futuro e o tempo necessário para a **implementação de ER**;
2. O **potencial técnico viável das ER** em diferentes regiões;
3. Os **desafios técnicos e institucionais**, bem como os custos relacionados à integração de diversas **tecnologias de ER** aos sistemas e mercados de energia;
4. A avaliação abrangente dos **impactos socioeconômicos e ambientais das ER** e outras tecnologias energéticas;
5. As oportunidades de fornecer serviços de **energia sustentável** para países em desenvolvimento;
6. Os mecanismos **políticos, institucionais e financeiros** que facilitam a **implementação econômica das ER** em diversos contextos.

REFERÊNCIAS

[1] OUR WORLD IN DATA. **CO₂ emissions**. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>.

[2] GMD. Copernicus. **Articles**. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/9/2853/2016/>.

REFERÊNCIAS

[3] ESSD. Copernicus. **Articles.** Disponível em:
<https://essd.copernicus.org/articles/14/4811/2022/>.

[4] NASA. Science. **Climate Change.** Disponível em:
<https://science.nasa.gov/climate-change/>.

[5] NASA. Earth Observatory. **Carbon Cycle.** Disponível em:
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>.

[6] UCAR. SciEd. **How Climate Works: Greenhouse Effect.** Disponível em:
<https://scied.ucar.edu/learning-zone/how-climate-works/greenhouse-effect>.

[7] NASA. NSSDC. **Earth Fact Sheet.** Disponível em:
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>.

[8] NOAA. Research. **No Sign of Greenhouse Gases Increases Slowing in 2023.** Disponível em: <https://research.noaa.gov/2024/04/05/no-sign-of-greenhouse-gases-increases-slowing-in-2023/>.

[9] NASA. Earth Observatory. **Ocean Carbon.** Disponível em:
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/OceanCarbon/page1.php>.

[10] OUR WORLD IN DATA. **Population regions with projections.** Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/population-regions-with-projections?stackMode=relative&time=1700..2025>

[11] IPCC. Assessment Report AR4. Disponível em:
<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar4/>.

[12] PCC. Technical Summary. Disponível em:
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/Technical-Summary-1.pdf>.



CAPITULO 03

ENERGIA ZERO CARBONO



2. Energia Zero Carbono

a. Zero Carbono: emissão nula

(Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas)

Como discutido anteriormente, quando o **carbono** (na forma de dióxido de carbono, ou CO₂.) e outras emissões que retêm calor na atmosfera terrestre são liberadas no ar, elas agem como um cobertor, **mantendo o calor em nossa atmosfera e aquecendo o planeta como um todo.**

Com a intensificação do uso de **fontes de energia à base de combustíveis fósseis**, como o que ocorreu na Terra a partir da **primeira revolução industrial**, as concentrações de gases promotores do **efeito estufa** na atmosfera terrestre aumentou consideravelmente, alterando o equilíbrio que torna o **efeito estufa** algo positivamente decisivo para a manutenção da vida na Terra.



De fato, quando **carvão ou gás natural** são usados em usinas **termelétricas**, ou combustíveis são queimados em **motores de combustão** interna de automóveis, aviões ou embarcações, quantidades relevantes de dióxido de carbono, além de outras emissões que **alteram o equilíbrio do efeito estufa**, são lançados na atmosfera, agravando ainda mais um problema que estende a muitos anos, cuja mitigação ainda demandará muitos anos mais.

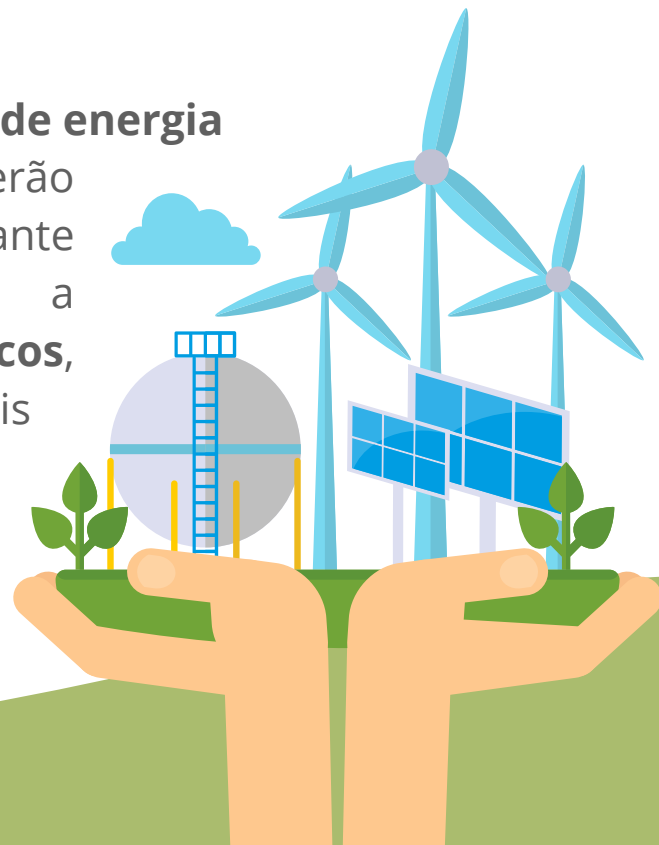
Neste contexto, **Zero Carbono significa, então, emissão nula.** Significa, portanto, que nenhuma emissão de carbono ou qualquer outro gás que possa agredir a atmosfera terrestre está sendo produzida a partir de um produto ou serviço (por exemplo, um parque eólico gerando eletricidade ou uma bateria distribuindo eletricidade).

Fontes de energia como eólica, nuclear e solar não criam emissões de carbono quando são usadas para produzir eletricidade. Nos referimos a essas fontes como fontes de Energia Zero Carbono.



Contudo, outras formas de conversão de energia em energia elétrica, ainda que bem menos conhecidas, podem ser exploradas em nosso dia-a-dia, principalmente quando se pensa na **autogeração de energia como uma forma complementar e sustentar a crescente demanda por energia elétrica** requerida pela sociedade contemporânea em que estamos inseridos.

Essas **fontes de coleta e conversão de energia limpa e sustentável**, que serão apresentadas e discutidas mais adiante neste *e-book*, estão associadas a **fenômenos físicos específicos**, usualmente encontrados em materiais que possuem características, do ponto de vista químico e físico, também específicas.



b. Carbono Zero: Mitigação

(Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas)

O **conceito carbono zero** diferencia-se do **Zero Carbono** de forma radical. O conceito carbono zero tem tudo a ver com "equilibrar", "cancelar" ou "mitigar" qualquer emissão de carbono que venha a ser produzida nas atividades humanas cotidianas.

Alcançamos o estágio carbono zero quando a quantidade de gases de efeito estufa produzida não é maior do que a quantidade que pode ser retirada da atmosfera pelos variados processos de absorção de carbono, como os discutidos anteriormente.



ZERO
EMISSION



Carbono zero, então, diz respeito à **mitigação de emissões de GEE produzidos por um produto ou serviço**. No contexto da geração de energia, um exemplo seria a utilização de biocombustíveis de origem vegetal que, para sua produção em larga escala, utilizam uma quantidade de matéria prima, obviamente, de origem vegetal (cana de açúcar, por exemplo, no caso do etanol).

Assim, no processo de **crescimento das matérias primas vegetais** uma quantidade muito grande de carbono é sequestrada, mitigando as emissões futuras quando da utilização desses biocombustíveis.

c. Pegada de Carbono

(Ivair Aparecido dos Santos e Valdirlei Fernandes Freitas)

O que se denomina como “**pegada de carbono**” é a quantidade total de GEE que são gerados e liberados no meio ambiente devido às ações humanas.



Neste sentido, para que as mudanças climáticas sejam minimizadas ou mesmo evitadas, é necessário que empresas, governos e cidadãos do mundo preocupem-se com suas pegadas de carbono, e trabalhem de forma coletiva e coordenada para que a geração antropogênica (aquela associada às atividades humanas) de GEE diminua o máximo possível ao longo dos próximos anos.

Para se ter uma ideia, segundo o *The Nature Conservancy (TNC) Project* [1] a **pegada de carbono média de um cidadão norte americano é de 16 toneladas anuais**, que é uma taxa muito acima da média global, que gira em torno de 4 toneladas anuais.

Os pesquisadores desse projeto afirmam que para evitar um aumento de 2 °C nas temperaturas globais no próximos anos, a pegada de carbono global média anual precisa ser diminuída para menos de 2 toneladas por ser humano até 2050.

Ou seja, vislumbra-se um longo caminho para que essa diminuição venha efetivamente a ocorrer.

Contudo, pequenas mudanças em nossas ações cotidianas, como optar pelo uso de **transporte público em detrimento do privado** (que é, quase sempre, individual!), ou mesmo fazer uso de **biocombustíveis em detrimento dos combustíveis fósseis**, pode ajudar nessa busca pelo equilíbrio em termos de emissões de GEE, com ganhos substanciais para todo o planeta.

REFERÊNCIAS

[1] THE NATURE CONSERVANCY. **The Nature Conservancy**. Disponível em: <https://www.nature.org>.



NAPI
Energia
Zero-Carbono

CAPITULO 04

FONTES DE ENERGIA ZERO CARBONO PARA AUTOGERAÇÃO



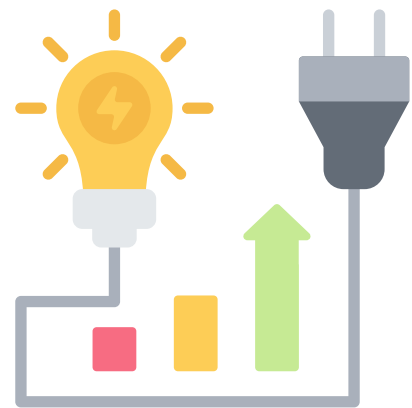
4. Fontes de Energia Zero Carbono para autogeração

a. Introdução

(Diogo Zampieri Montanher)

A **disponibilidade de energia** é o calcanhar de Aquiles de uma sociedade que vive em constante expansão tecnológica e de consumo.

Demandamos a cada dia que passa **mais energia para suprir uma produção crescente de bens de consumo**, assim como usamos cada vez mais energia para realizar as atividades básicas do dia a dia.



As fontes energéticas mais utilizadas na atualidade são limitadas, poluentes e geram grandes impactos ambientais.

Como exemplos têm os **combustíveis fósseis**, que poluem o ar que respiramos e contribui para o aquecimento global; os **biocombustíveis**, que embora menos poluente necessita de grandes extensões de terra para o plantio de matéria prima.

No cenário atual, **innovar e diversificar a matriz energética é fundamental** para termos um desenvolvimento sustentável.

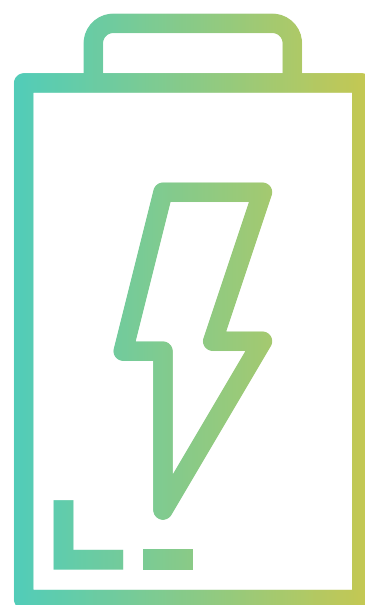
Inovar no sentido de **desenvolver tecnologias** que nos permitam **obter com eficiência energia limpa e renovável**, livre de emissões de gases poluentes e com baixo impacto ambiental. E **diversificar** para não ficarmos **dependentes de uma única fonte de energia**.

No campo da diversificação, **sistemas para autogeração de energia** tem se popularizado por meio dos **painéis solares**.

Esses dispositivos operam com base em um fenômeno físico conhecido como **efeito fotoelétrico**, descoberto a quase 150 anos atrás.

Na atualidade, outros fenômenos físicos descobertos em um passado relativamente recente têm motivado cientistas e engenheiros a desenvolver **dispositivos para a autogeração de energia**.

Como exemplo, temos o **efeito piezoelétrico**, que consiste na **conversão de uma tensão mecânica em “voltagem” elétrica** por meio de materiais cerâmicos com propriedades especiais; de forma similar, o **efeito piroelétrico** consiste na conversão de uma variação de temperatura em “voltagem” elétrica; já o **efeito triboelétrico** é definido pela geração de energia elétrica por meio de atrito.



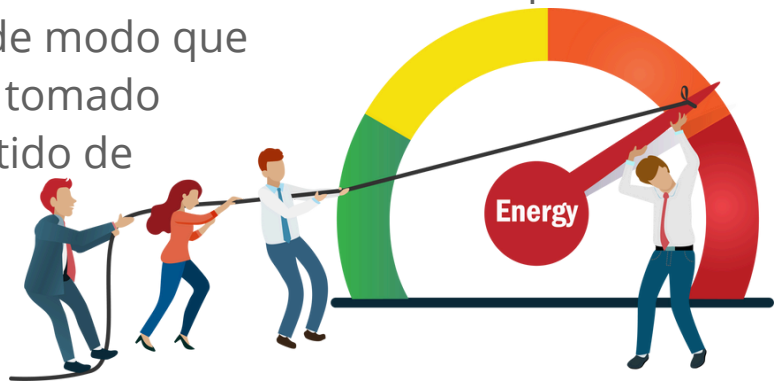
Esses e outros fenômenos, assim como os **dispositivos de autogeração de energia decorrentes deles**, serão apresentados com maior detalhamento nas próximas seções desse capítulo.

b. Energia Piezelétrica

(Diogo Zampieri Montanher)

A tecnologia nos proporciona dispositivos que tornam nossa vida mais fácil e confortável, eletrodomésticos, smartphones, carros elétricos e tantos outros facilitam o nosso dia a dia. Entretanto, **toda essa modernidade nos torna cada vez mais dependente da energia elétrica.**

O **alto consumo energético** da sociedade contemporânea acendeu um sinal de alerta, de modo que cientistas e governantes tem tomado medidas importantes no sentido de **minimizar os impactos gerados por sua produção.**



Usinas termoelétricas operam com a queima de combustíveis fósseis, aumentando a concentração de gases poluentes na atmosfera.

Usinas hidroelétricas produzem energia limpa, mas não podem ser implantadas em todos lugares, pois necessitam de recursos hídricos e relevo favorável, além de que sua construção afeta severamente a fauna e flora da região.

Parques eólicos, que produzem energia elétrica a partir dos ventos, também apresentam impactos ambientais, e também encontram como limitação as condições climáticas da região, sendo viável apenas em territórios de ventos intensos e constantes.

A **energia solar** talvez seja a mais limpa de todas as citadas anteriormente, mas sua produção é obviamente interrompida ao por do sol.

Dentre todas as formas de produção de energia elétrica, não é possível apontar qual a melhor ou pior, pois sua implementação depende de diversos fatores, contidos nas esferas social, econômica e ambiental.

Deste modo, a aposta de cientistas, governantes e investidores esta na **diversificação das matrizes energéticas e na descentralização de sua produção**. Em outras palavras, estamos iniciando uma jornada onde cada ente da sociedade (governo, empresas privadas e consumidores) sejam produtores de energia elétrica, **cabendo a cada um escolher a matriz energética que mais se adeque a sua realidade**.



Nesse contexto, o **fenômeno da piezeletricidade** se apresenta como candidato para a geração de energia elétrica em pequena escala.

Esse fenômeno ocorre em materiais especiais, produzidos com tecnologia que manipula a matéria em nível atômico, e é caracterizado pela **conversão de energia mecânica em energia elétrica**.

Mais especificamente, quando uma tensão ou deformação mecânica atua sobre esses materiais, eles apresentam como reação a geração de uma diferença de potencial, conhecida popularmente como “**voltagem elétrica**”.

Cientistas e engenheiros têm criado mecanismos e dispositivos para a microgeração de energia com materiais piezelétricos, a seguir apresentaremos algumas iniciativas.

01. Geradores vestíveis

Movimentos biomecânicos do corpo humano, como das pernas ao caminhar e correr, movimento dos dedos e assim por diante, geram energia residual suficiente para alimentar dispositivos eletrônicos de pequena escala.



Dentre todos os **movimentos biomecânicos**, o **movimento das pernas** pode proporcionar potência máxima, devido a torques mais elevados em comparação com outros membros.

A **tecnologia piezoelétrica** provou ser um dos métodos eficazes de captação de energia nesses casos, e esse conceito do uso do corpo humano para gerar energia não resulta em resíduos poluentes.

Um exemplo são os calçados de modo geral, eles possuem potencial gerador de energia pelo impacto que constantemente sofrem.



A combinação deles com a principal propriedade dos **materiais piezelétricos** abre margem para a produção de energia em pequena escala, como já dito, mas que supre a necessidade diária do carregamento de baterias de utensílios do dia a dia como celulares, notebooks, fones e etc.

A **figura 1** ilustra essa aplicação da **piezeletricidade** em microgeradores de energia vestíveis.



Figura 1: Gerador de energia piezoelétrico instalado entre a palmilha e a sola do calçado. (Imagem adaptada de Shenck, N.S e Jung, W.-S)

02. Cidades Inteligentes

Ruas bem movimentadas, calçadas com grande fluxo de pessoas e até mesmo estabelecimentos de grande movimentação **são potenciais fornecedores de energia para manter iluminação pública/privada**, sinalização de ruas, comércios diversos e até mesmo carros elétricos que estão em alta.

O impacto de nossos pés no solo e de nossos carros nas ruas são facilmente convertidos em **energia elétrica com materiais piezoelétricos** quando os mesmos são aplicados por baixo do solo, **tornando uma cidade em uma cidade inteligente.**

A instalação de geradores piezoelétricos em estradas, e se estendendo a calçadas e pisos em geral, aproveitaria dessa forma energia que geralmente é desaproveitada.

Um projeto-piloto realizado pela empresa *Innowattech* em 2010 instalou materiais piezelétricos de 5,5 cm de espessura sob o asfalto de um trecho de 10 metros estrada, resultando na produção de 1 kW quando submetido a passagem de 1000 caminhões.



Segundo cálculos da mesma instituição, **até 20 carros passam por uma via expressa a cada minuto, podendo esse trânsito gerar 200 kW/h**, o suficiente para abastecer uma casa por um mês.

O professor Haim Abramovich, fundador da organização, explica que em uma **avenida com menos de 1,6 quilômetros**, quatro faixas e por onde circulam cerca de mil veículos por hora pode gerar aproximadamente 0,4 MW, **sendo o suficiente para alimentar até 600 casas**.

Da mesma maneira que é utilizado em estradas, a exploração da geração de energia em calçadas e pisos vem ganhando espaço entre os pesquisadores da *Innowattech*.

A **exploração da geração de energia em calçadas e em pisos** em geral, se aplicada em lugares onde o fluxo de pessoas é alta, pode gerar grandes quantidades de energia.

Estimasse que para cada 100 metros de piso piezelétrico pode gerar 1 KW se 3000 pessoas passarem pelo local.



Segundo cálculos da mesma instituição, **até 20 carros passam por uma via expressa a cada minuto, podendo esse trânsito gerar 200 kW/h**, o suficiente para abastecer uma casa por um mês.

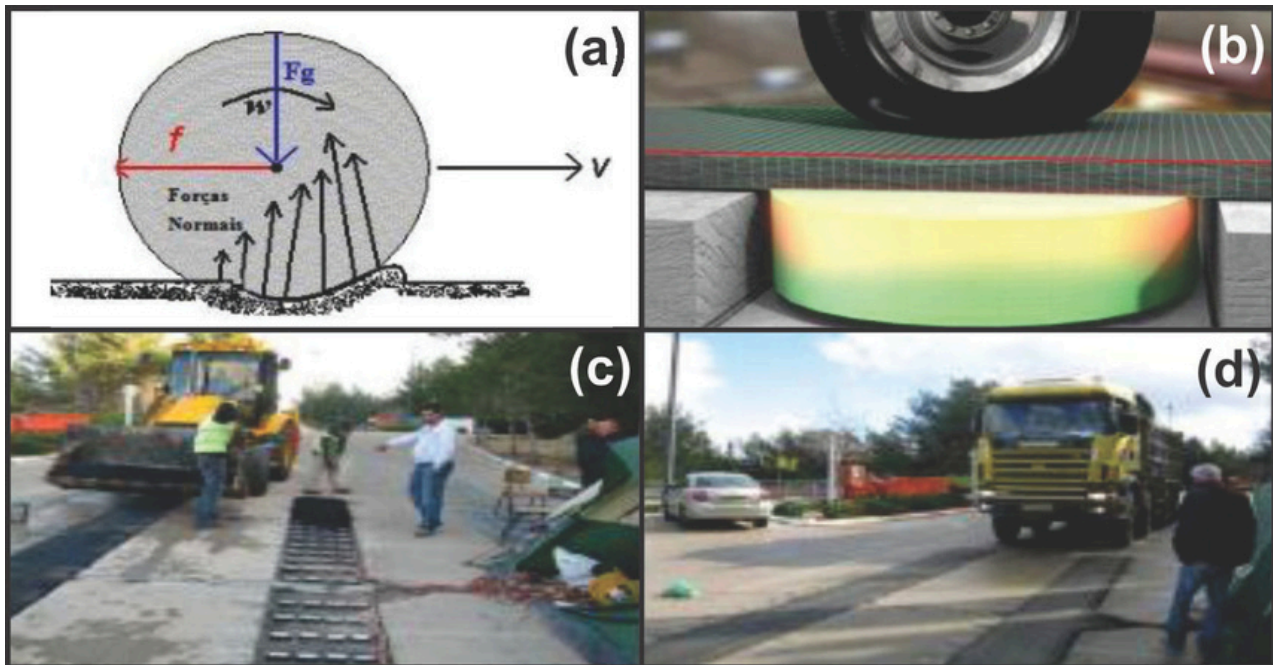


Figura 2: Captação de energia em estradas. (a) Análise das forças de contato entre estrada e pneus. (b) Simulação computacional do sistema. (c) Instalação do sistema na estrada. (d) Teste. (Imagem adaptada de Innowattech)

03. Dispositivo Gerador Piezelétrico/Eólico

Se tratando da energia dos ventos, a **Figura 3** ilustra um coletor de energia eólico desenvolvido por Paulo e Silva, A. G. et al. (2021), que é composto por uma **hélice fixada a um eixo**, livre para girar por meio de dois mancais, com um encoder na outra extremidade do eixo para medir a rotação.

No corpo do eixo estão instalados três ímãs, e abaixo de cada ímã estão **vigas cantilever otimizadas**, com **cerâmicas piezelétricas de titanato zirconato de chumbo (PZT)** coladas nas superfícies planares.

Em cada viga engastada, estão acoplados ímãs permanentes de neodímio na extremidade em balanço.

O funcionamento do equipamento ocorre quando o **vento incide sobre a hélice**, que converte a energia cinética em trabalho de eixo. Quando um ímã do eixo se aproxima do ímã da viga cantilever, uma **força de repulsão magnética empurra a viga**, que, ao tentar retornar à sua posição de equilíbrio, começa a oscilar.

A viga em movimento oscilante comprime e traciona o **material piezelétrico**, gerando assim uma diferença de potencial em seus terminais. Foi utilizada uma ponte retificadora de onda completa para converter a corrente alternada em corrente contínua e um motor elétrico acoplado para ao eixo, para testar o coletor.

Segundo os autores, a potência final do dispositivo, quando a velocidade do eixo excitasse as vigas de modo a atingir a ressonância, foi calculada com base no volume que o coletor ocupa, e foi de $11,5 \mu\text{W}/\text{mm}^3$.

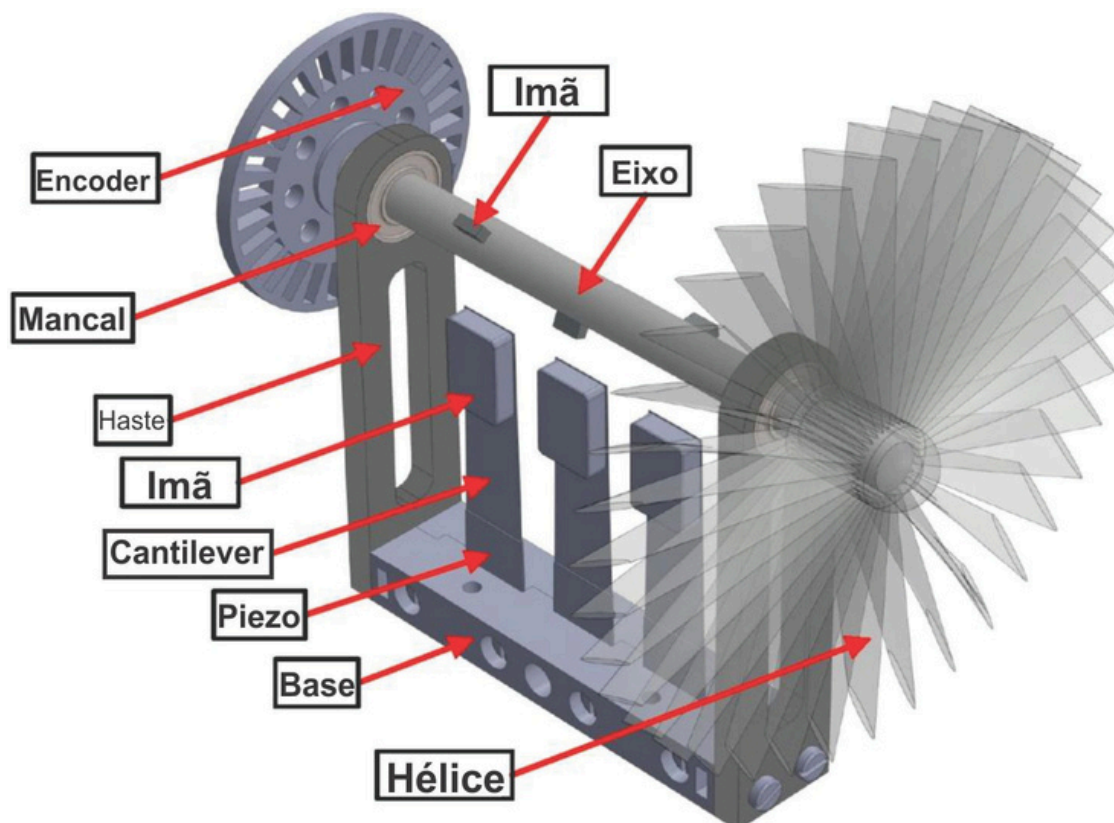


Figura 3 - Coletor de energia eólica utilizando materiais piezelétricos. (imagem adaptada de Paulo e Silva, A. G. et al.)

04. Dispositivo Gerador Piezelétrico/Marítimo

Já um equipamento que utiliza **materiais piezelétricos** para a conversão da energia das ondas oceânicas em energia elétrica foi proposto por Chen, S. E., et al. (2023), conforme apresentado na **Figura 4a**.

O coletor de energia é composto por uma bóia flutuante conectada a um sistema de guia, que **converte o movimento oscilatório da bóia em um movimento linear**.

Conforme mostrado na **Figura 4b**, o sistema deslizante está acoplado a uma cremalheira, conectada a um came engrenado de três dentes, que é preso a um eixo livre para girar devido a um rolamento unidimensional acoplado.

No eixo estão fixados um volante e um came, e próximo ao came, um feixe com seis vigas **cantilever piezelétricas** engastadas na estrutura.

O dispositivo funciona quando as ondas oceânicas fazem a bóia oscilar. Esse movimento é convertido em movimento linear, que, devido à cremalheira, é transformado em rotação do eixo fazendo o conjunto de cames girar.

Quando os cames colidem com as extremidades das vigas, elas oscilam e sofrem internamente tensões de tração e compressão, **produzindo assim eletricidade.**

Os autores utilizaram um circuito de filtro FDR e testaram o dispositivo em um canal gerador de ondas artificiais.

O dispositivo teve o seu melhor desempenho com ondas 50 mm de altura com períodos de 1 segundo, e gerou uma tensão média de 4,47 V e potência média de 0,4 mW.

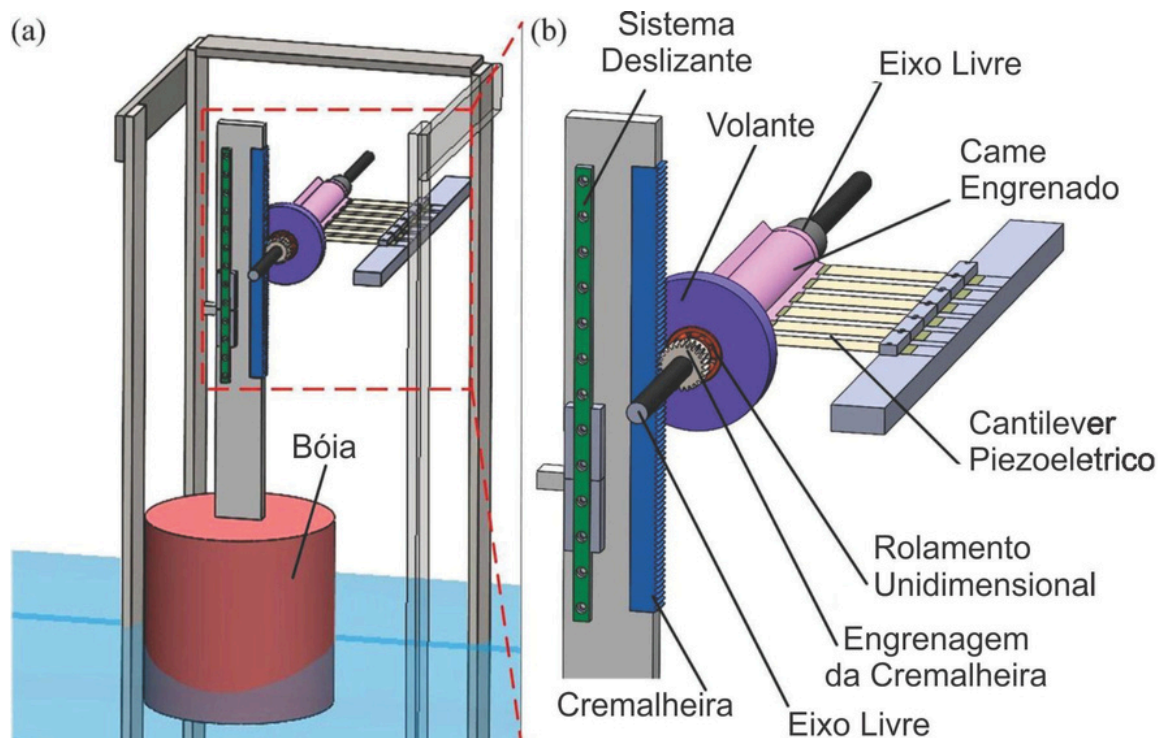


Figura 4 - Coletor de energia piezoeletrico: a) coletor de ondas oceânicas; b) mecanismo que converte o movimento oscilatório da bóia em movimento linear (imagem adaptada de Chen, S. E. et al.).

REFERÊNCIAS

CHEN, S. E.; PAN, F.-T.; YANG, R. -Y.; WU, C. -C. **A multi-physics system integration and modeling method for piezoelectric wave energy harvester**. Applied Energy, v. 349, p. 121654, nov. 2023.

Energy Floors. **The moves of the public as a source of energy**. Disponível em: <https://energy-floors.com/products/kinetic-dancefloor/>. Acesso em 16 Jul. 2024.

FERREIRA, Andreia Cristina; OLIVEIRA, Joel; RAMOS, Rui AR. **Tecnologias sustentáveis para a produção de energia a partir de estradas**. 2012. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/24621>. Acesso em 16 Jul. 2024.

REFERÊNCIAS

HAMLEHDAR, M.; KASAEIAN, A.; SAFAEI, M. R. **Energy harvesting from fluid flow using piezoelectrics: A critical review. Renewable Energy**, v. 143, p. 1826–1838, dez. 2019.

Innowattech. **The Innowattech Green Energy Solution**. 2010. Disponível em: <http://www.innowattech.co.il/technology.aspx>. Acesso em 15 Jul. 2024.

Innowattech. **Innowattech of Israel generates electricity from road traffic**. 2010. Disponível em: <https://www.israel21c.org/innowattech-of-israel-generates-electricity-from-road-traffic/> Acesso em 15 Jul. 2024.

Jung, W.-S.; Lee, M.-J.; Kang, M.-G.; Moon, H.G.; Yoon, S.-J.; Baek, S.-H.; Kang, C.-Y. **Powerful Curved Piezoelectric Generator for Wearable Applications**. Nano Energy, Coreia do Sul, v. 13, n.1, p. 174–181, Abr. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211285515000683>. Acesso em: 19 Jun. 2024.

Katz, A. (2009) **Technion prototype road harvests clean electricity**. Technion Focus Magazine, Israel. Disponível em: <http://www.focus.technion.ac.il/Mar09/researchStory4.htm> Acesso em 15 Jul. 2024.

MOKHTARI, F.; SPINKS, G. M.; FAY, C.; CHENG, Z.; RAAD, R.; XI, J. and FOROUGH, J. Wearable electronic textiles from nanostructured piezoelectric fibers. Advanced Materials Technologies, Wollongong - Australia, v. 5, n. 4, p. 190-900, Fev. 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/admt.201900900>. Acesso em: 15 Jul. 2024.

PAULO E SILVA, A. G.; BASÍLIO SOBRINHO, J. M.; DA ROCHA SOUTO, C.; RIES, A.; DE CASTRO, A. C. Design, modelling and experimental analysis of a piezoelectric wind energy generator for low-power applications. Sensors and Actuators A: Physical, v. 317, p. 112462, jan. 2021.

REFERÊNCIAS

Perlingeiro, Antônio R.; Pimenta, Gilberto M.; Silva, Salviano E. **GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS**. Rio de Janeiro. p. 1-62, Jul. 2016.

PRAHARAJ, Swetapadma; ROUT, Dibyaranjan. **Piezoelectric Technology: Materials and Applications for Green Energy Harvesting**. CRC Press, 2023.

ROCHA, José Gerardo et al. **Energy harvesting from piezoelectric materials fully integrated in footwear**. *IEEE transactions on industrial electronics*, Guimarães - Portugal, v. 57, n. 3, p. 813-819, Ago. 2009. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5196774>. Acesso em: 17 Jul. 2024.

SANTOS, Marco Aurélio dos. **Fontes de Energia Nova e Renovável**. 1. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2013. 193 p.

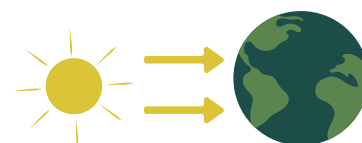
Shenck, N.S. and Paradiso, J.A. **Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics**. *IEEE Micro*, v. 21, n. 3, p. 30-42, Jun. 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/220290891_Energy_Scavenging_with_Shoe-Mounted_Piezoelectrics. Acesso em: 15 Jul. 2024.

c. Piroelétrico

(Diogo Zampieri Montanher)

Na secção anterior vimos alguns dispositivos que permitem a **conversão da energia mecânica em energia elétrica**. Porém, para um melhor aproveitamento de energia devemos buscar mecanismos que nos permita **aproveitar ao máximo todo e qualquer tipo de energia disponível na natureza**.

A **energia térmica** é abundante em nosso planeta, pois o Sol aquece a sua superfície, os mares, rios, lagos e tudo mais que nele esta presente.



Energia térmica na forma de calor também é gerada pelo **movimento de nosso corpo**, pelo atrito entre objeto. Nas indústrias, muitos processos produtivos **geram como resíduo enormes quantidades de calor**, que são descartados em rios, lagos ou no ar atmosférico.

O **aproveitamento dessa energia térmica** aumenta a **eficiência energética**, reduzindo conseqüentemente o consumo de fontes não renováveis e poluentes, como os combustíveis fósseis e gases naturais.



Deste modo, cientistas e engenheiros tem se empenhado no estudo de fenômenos e na criação de **dispositivos** que possibilitem a **conversão de energia térmica em energia elétrica**.

Um caminho para obter essa conversão de energia é por meio dos **materiais piroelétrico**.

Os **materiais piroelétricos** são **dielétricos cerâmicos** ou **poliméricos**, apresentam estrutura cristalina sem centro de simetria. Quando submetidos a uma variação de temperatura, tensões mecânicas internas são estabelecidas, polarizando o material via **efeito piezoelétrico**.

Por fim, a variação da **polarização elétrica** em função do **tempo** gera uma **corrente elétrica**. Deste modo, podemos expressar o **efeito piroelétrico** nos seguintes termos:

$$i_p \propto \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{\Delta P}{\Delta T} \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

A expressão acima nos diz que a **corrente piroelétrica** gerada (i_p) é proporcional a variação da **polarização elétrica** (ΔP) com relação a **variação do tempo** (Δt). Ela nos diz ainda que a variação temporal da polarização elétrica é intermediada por uma **variação de temperatura** (ΔT).

É evidente que precisamos submeter o **material piroelétrico** a uma **variação de temperatura** para que **energia elétrica** seja produzida. Entretanto, apenas isso não é suficiente.

Outro requisito é a aplicação de **altos campos elétricos**, seguindo um ciclo com quatro processos, ilustrado na **Figura 1** e descrito a seguir:

Outro requisito é a aplicação de **altos campos elétricos**, seguindo um ciclo com quatro processos, ilustrado na **Figura 1** e descrito a seguir:

Processo A→B) Aumento do campo elétrico com temperatura constante: Como consequência temos uma variação positiva da polarização.

Processo B→C) Aumento de temperatura com campo elétrico constante: Resultando em uma variação negativa da polarização.

Processo C→D) Redução do campo elétrico com temperatura constante: Como consequência obtemos uma variação negativa da polarização.

Processo D→A) Redução da temperatura com campo elétrico constante: Resultando em uma variação positiva da polarização.

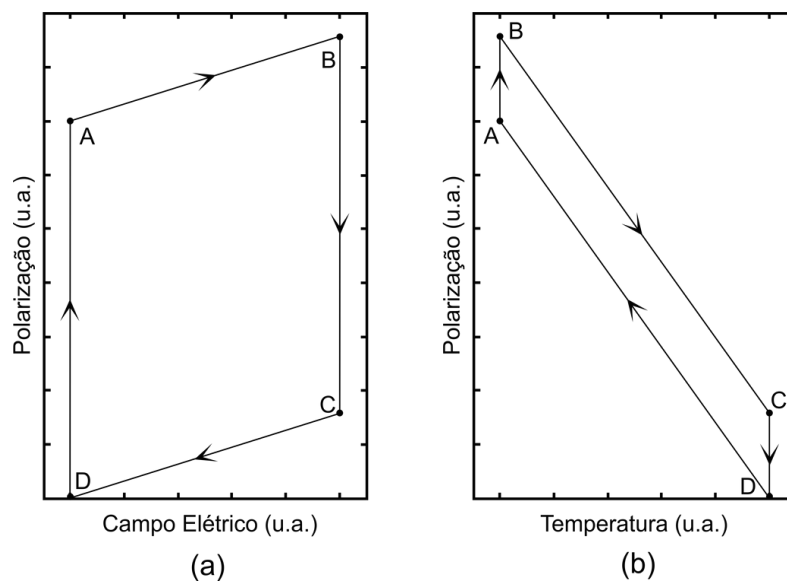


Figura 1: Ciclo piroelétrico representado em diagrama (a) Polarização VS Campo elétrico (b) Polarização VS Temperatura. O diagrama da Figura 1(b) é uma aproximação que considera o coeficiente piroelétrico independente do campo elétrico. (autoria própria)

Para que o **material piroelétrico** opere de acordo com o ciclo descrito, dois sistemas auxiliares devem ser acoplados a ele.

Um deles consiste de uma **fonte de tensão eletronicamente controlada** para gerar o **campo elétrico** e o outro consiste em um **sistema de aquecimento e resfriamento alternado**, que pode ser realizado por meio de um fluxo controlado de água quente e fria, conforme ilustrado na **Figura 2**.

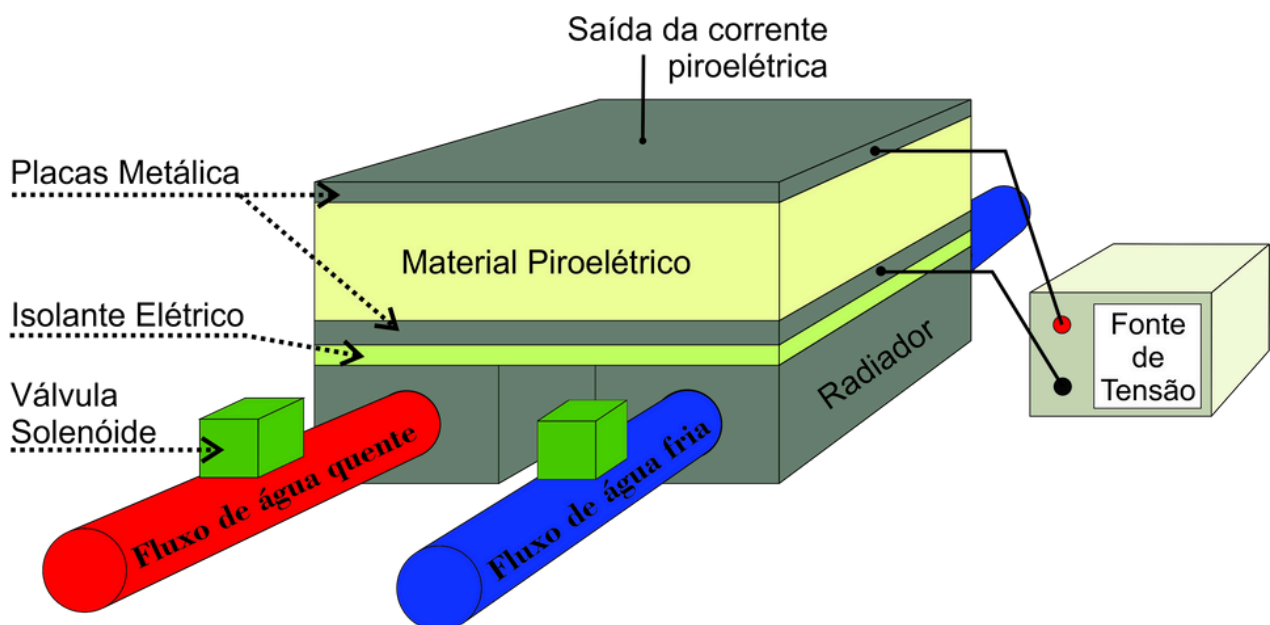


Figura 2: Configuração básica de um gerador de energia piroelétrico. (autoria própria)

As placas metálicas, dispostas em configuração paralela, produzem um campo elétrico uniforme no **material piroelétrico** quando submetidos a uma diferença de potencial aplicada pela fonte de tensão.

Os radiadores otimizam as trocas de calor do **material piroelétrico** com a água, enquanto as válvulas solenóides controlam o fluxo de água quente e fria para promover um aquecimento e resfriamento alternado.

A camada isolante elétrica atua de modo a evitar **fugas de corrente elétrica** para o sistema de aquecimento e resfriamento.

Embora a fonte de tensão consuma energia para fazer o gerador piroelétrico operar, a **energia elétrica produzida por ele supera os gastos**. Isso se deve ao fato de que energia na forma de calor é absorvida pelo dispositivo e convertida em corrente elétrica.

É claro que, se aquecermos a água com o único propósito de colocar o gerador em funcionamento, teremos ao final do processo gasto energético.

Porém, o propósito desse tipo de gerador é o **aproveitamento da energia térmica residual**, ou seja, coletar o calor que seria despejado em rios, lagos ou no ar atmosférico e transformá-lo em energia útil.



REFERÊNCIAS

SEBALD G.; PRUVOST S.; GUYOMAR D.; **Energy harvesting based on Ericsson pyroelectric cycles in a relaxor ferroelectric ceramic**. Smart Mater. Struct., v. 17, p. 15012, dez. 2008.

SEBALD G.; GUYOMAR D.; AGBOSSOU A.; **On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting**. Smart Mater. Struct., v. 18, p. 125006, set. 2009.

REFERÊNCIAS

KOUCHACHVILI L.; IKURA M.; **Pyroelectric conversion – Effects of P(VDF-TrFE) preconditioning on power conversion.** J. Electrostat., v. 65, p. 182, set. 2006.

BHATIA B.; DAMODARAN A. R.; CHO H.; MARTIN L. W. KING W. P.; **High-frequency thermal-electrical cycles for pyroelectric energy conversion.** J. Appl. Phys., v. 116, p. 194509, Nov. 2014.

KANG X.; JIA S.; XU R.; LIU S.; PENG J.; YU H.; ZHOU X.; **Highly efficient pyroelectric generator for waste heat recovery without auxiliary device.** Nano Energy, v. 88, p. 106245, jun. 2021.

d. Materiais i-Calóricos: Uma tecnologia alternativa a refrigeração convencional

(Cleber Santiago Alves e Flávio Clareth Colman)

Quando ouvimos o termo “**máquinas térmicas**”, as imagens que geralmente nos vêm a mente são aqueles motores a vapor, muito comuns nos meados do século XVIII e cujo princípio de funcionamento ainda hoje é usado para a geração de energia.

Por exemplo, as **usinas nucleares** são um tipo de máquina a vapor (um termo mais adequado seria “usina termelétrica”), que usa uma fonte radioativa como fonte geradora de calor no lugar do carvão mineral utilizado no passado.



No entanto, é importante dizer que a migração de uma fonte (o carvão mineral) para a outra (os materiais radioativos) não ocorreu repentinamente e que há outras fontes de energia que podem ser utilizadas no lugar delas: **óleo diesel**, **gás natural**, **biocombustíveis** (como o etanol) e **biomassa** (bagaço da cana de açúcar, por exemplo) podem ser citados como as mais comuns, especialmente em nações em desenvolvimento, como é o caso do Brasil.

A modernização dessas máquinas térmicas só foi possível por conta do avanço do conhecimento científico e do desenvolvimento de novas tecnologias, ambos impulsionados pela necessidade humana por energia.

Seja para aquecer ou resfriar ambientes, manter remédios ou alimentos conservados para uso por períodos mais longos, ou para fazer equipamentos funcionarem sem a necessidade do uso da força humana.

Tudo isso para dizer que **“energia”** é um tema importante para a nossa sobrevivência e que não há como renunciar a ela se pretendemos continuar prosperando como seres vivos que habitam esse planeta.

Ao mesmo tempo, a demanda por energia é cada vez mais crescente, por muitos motivos. Um deles é que a população mundial praticamente dobrou desde 1975¹ e hoje somos mais de 8 bilhões de humanos tendo que coexistir com os mesmos recursos naturais que já estavam disponíveis há mais de 50 anos. O custo ambiental que temos que pagar por isso tem sido gigantesco.

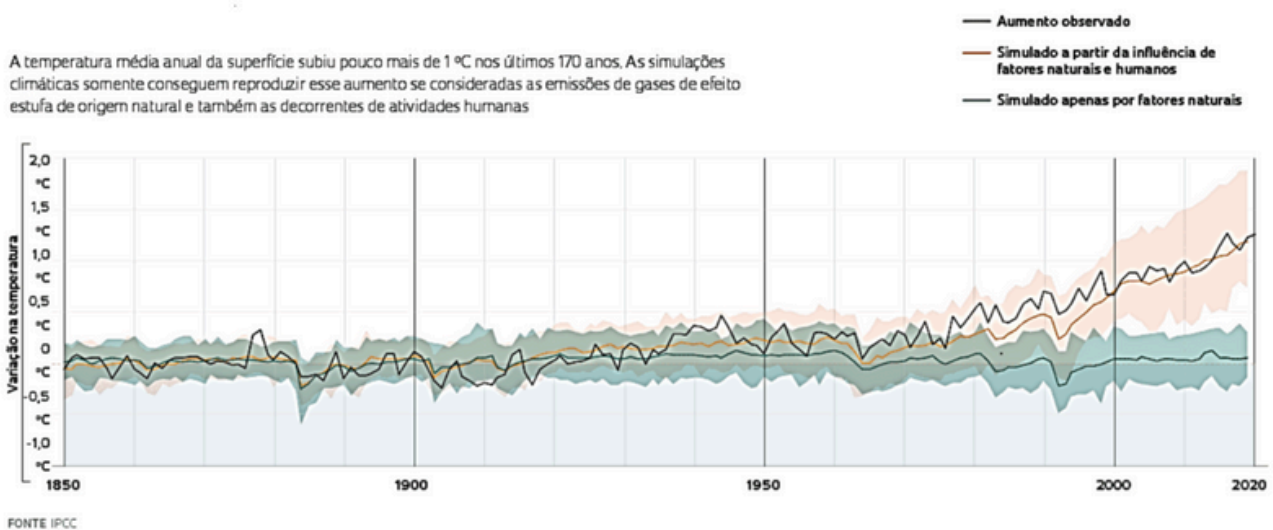


Figura 1. Aquecimento global em relação ao período pré-industrial
 . Fonte: WORLD POPULATION REVIEW. World population review.
 Disponível em: <https://worldpopulationreview.com/>.

Dois momentos foram decisivos para que os líderes da maioria das nações do mundo passassem a pensar em medidas que pudessem reduzir esse custo: **um na segunda metade dos anos 80 e outro na segunda metade dos anos 90.**

Em 1985, uma reunião de um grupo de nações realizada na Áustria e que ficou conhecida como **"Convenção de Viena para a Proteção da Camada de Ozônio"**, foi registrado o **primeiro movimento político para conter a destruição da camada de ozônio**, um fenômeno que já vinha sendo cientificamente estudado há mais de uma década, e que posteriormente rendeu o Nobel de Química aos pesquisadores Paul Crutzen e Frank Sherwood Rowland em 1995.

Dois momentos foram decisivos para que os líderes da maioria das nações do mundo passassem a pensar em medidas que pudessem reduzir esse custo: um na segunda metade dos anos 80 e outro na segunda metade dos anos 90.

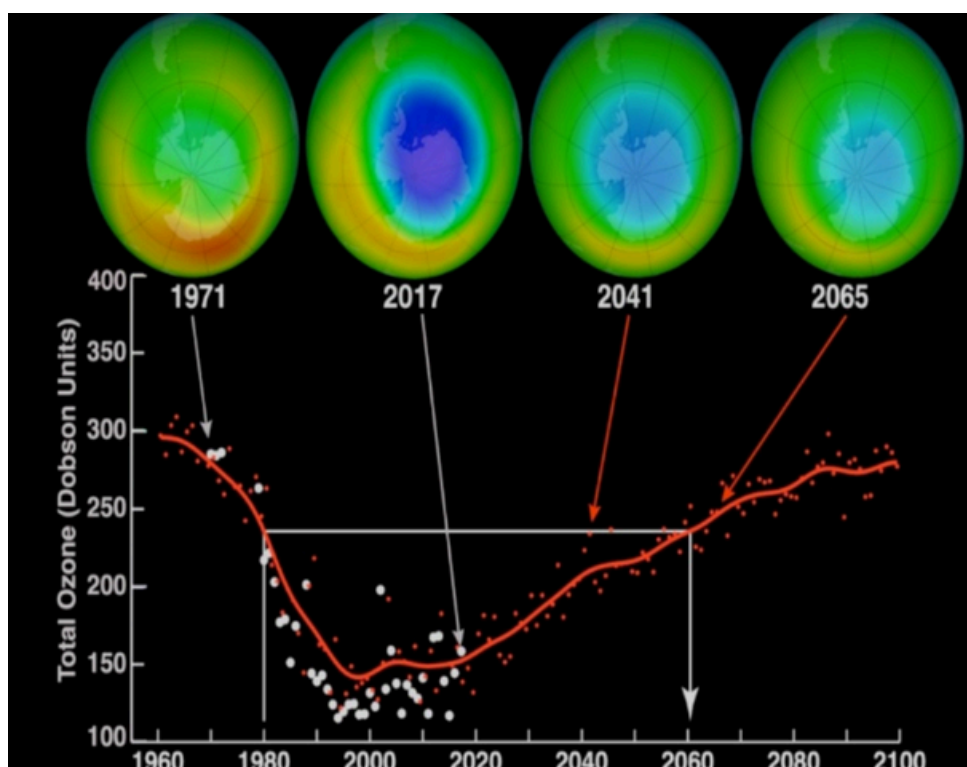


Fig. 2. Quantidade mínima de ozônio sobre a Antártida ao longo dos anos. Os pontos brancos representam a medida nos meses de outubro; a curva vermelha é a suavização dos resultados e previsão da recuperação da camada de ozônio. Fonte: NASA (2015)

Como consequência, em 1987 foi elaborado o que se tornou conhecido como **Protocolo de Montreal**, que entrou em vigor em 1989, estabelecendo metas para a extinção do uso de uma série de substâncias que passaram a ser identificadas como **Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio (SDO)**, dentre eles os gases que são comumente empregados para fazerem funcionar os refrigeradores e aparelhos de ar-condicionado, identificados como **HCFCs e CFCs**.

O acordo define que nenhum país signatário produza ou compre, a partir da década de 2030, nenhum desses fluidos.



Na prática, esses gases são capazes de mudar sua temperatura para valores **acima da temperatura ambiente quando são comprimidos**, ou resfriarem abaixo da temperatura ambiente quando expandidos (que é o oposto de comprimir).

Por isso que qualquer **refrigerador residencial**, por exemplo, deve possuir um **compressor** e uma **válvula de expansão**, de modo que todo o ciclo de refrigeração seja completado.

Um desenho esquemático de um equipamento convencional e seus estágios de funcionamento é mostrado a seguir:

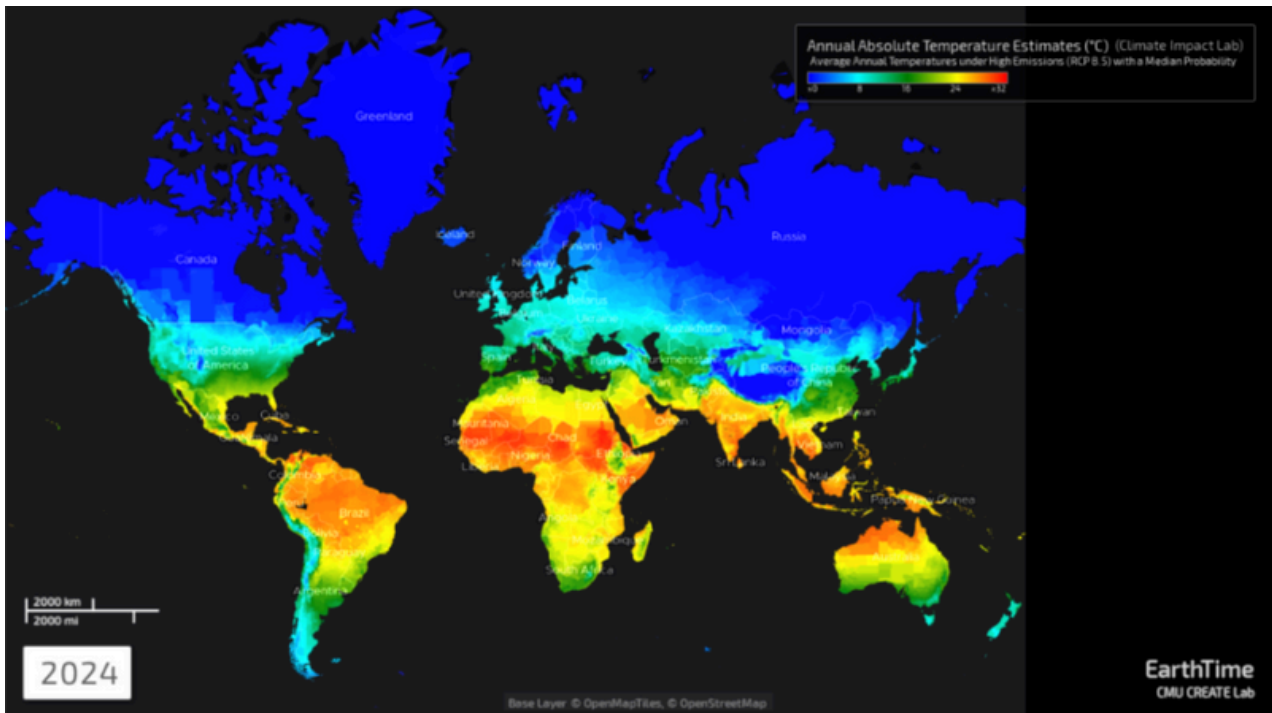


Fig. 3. Esquema do ciclo de compressão de vapor usado em refrigeradores convencionais. Fonte Takeuchi e Sandman [2]

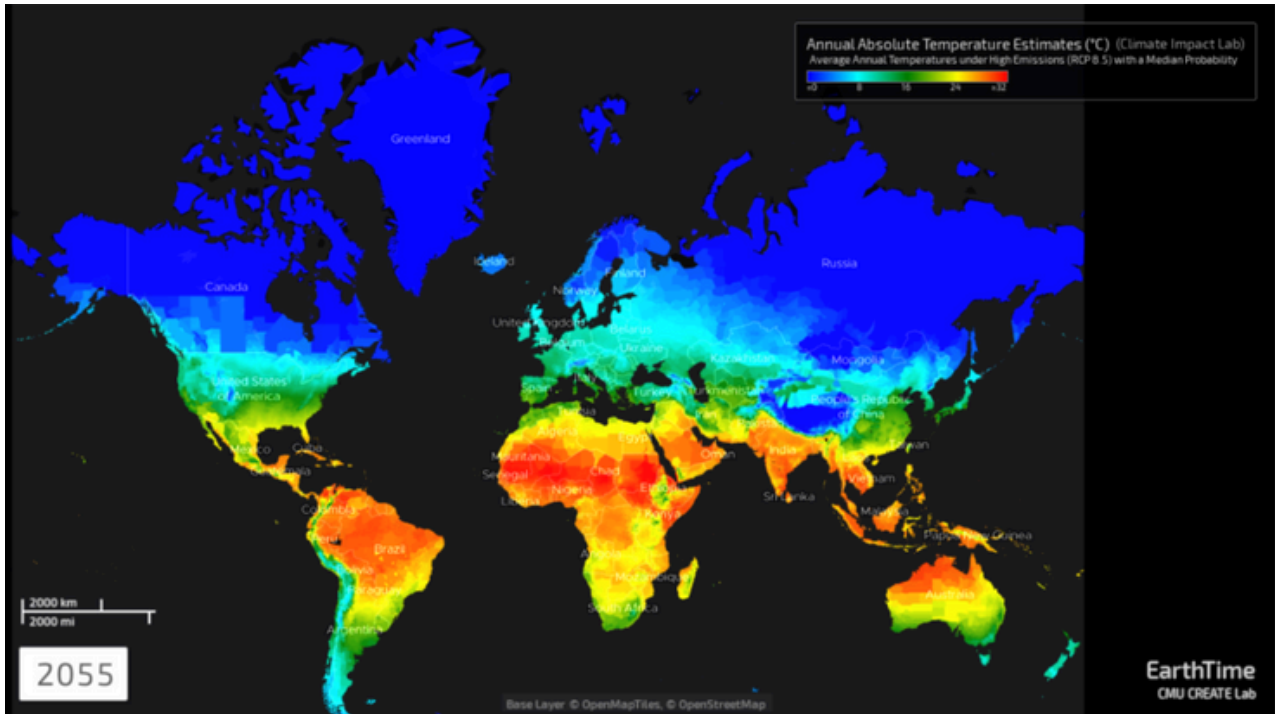
Uma questão importante que passou a ser feita a partir do **Protocolo de Montreal** foi sobre como evoluir a tecnologia de refrigeração com o **menor impacto ambiental possível**, além de garantir essa transição para equipamentos mais ambientalmente amigáveis, respeitando-se o prazo estabelecido pelo documento.



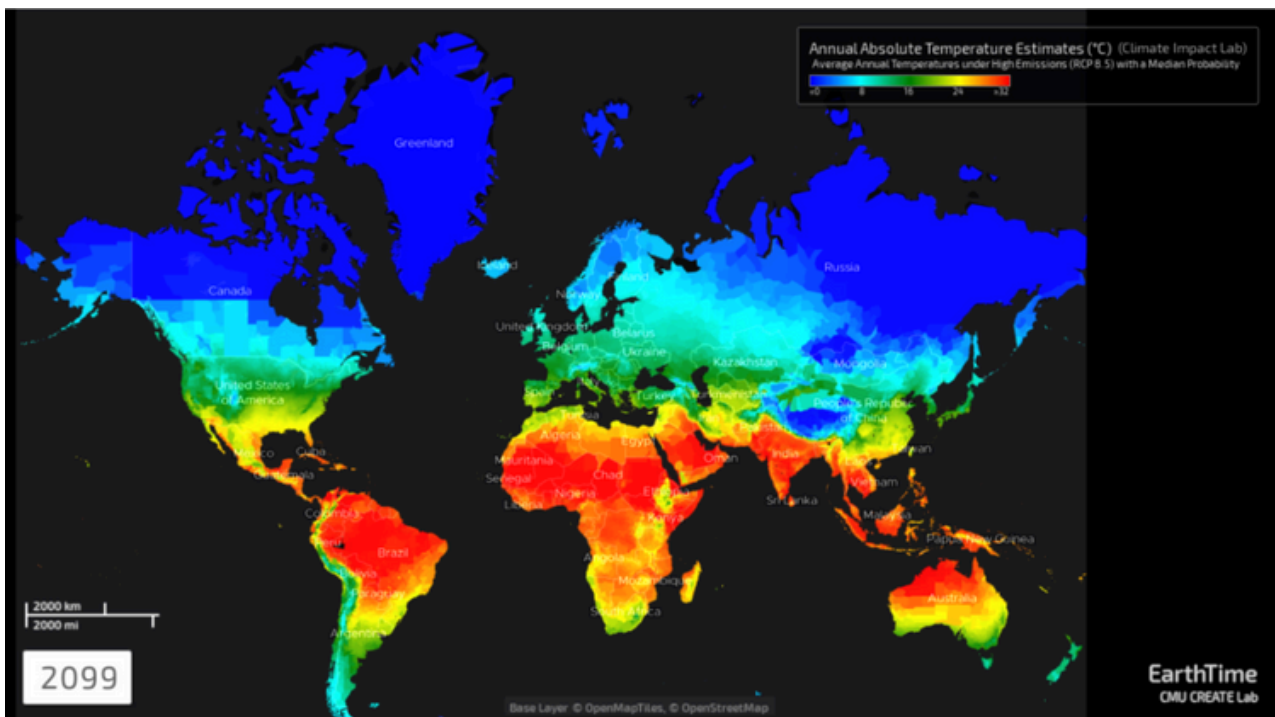
Essa corrida por substitutos que fossem tecnológica e ambientalmente viáveis esbarrou em um novo tipo de problema: **os novos fluidos de refrigeração adotados impactam significativamente sobre o aquecimento global.**



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Estimativa de temperatura absoluta: (a) para o ano de 2024, (b) para o ano de 2055 e (c) para o ano de 2099. Fonte: EARTHTIME. Explore. Disponível em: <https://earthtime.org/explore>.

E aqui devemos tratar do segundo momento decisivo para a **evolução das máquinas térmicas**, sobre o qual mencionamos anteriormente.



No final dos anos noventa foi defendido a hipótese de que o **planeta estava aquecendo muito rapidamente**, em um fenômeno conhecido como “**aquecimento global**”.

A fim de conter seus impactos sobre o meio-ambiente, em 1997 foi adotado o **Protocolo de Kyoto**, que tinha como propósito a **redução da emissão de gases que causam o aquecimento global por países desenvolvidos**.

Este foi um passo importante em direção ao **Protocolo de Paris** (2016), que passou a incluir também os países em desenvolvimento dentre aqueles que deveriam se comprometer a **adotar políticas para reduzir a emissão na atmosfera de substâncias com alto Potencial de Aquecimento Global** (ou Global Warming Potential - GWP), ou seja, de produtos que geram o efeito estufa.

Para se ter uma ideia, enquanto o valor do GWP para o CO₂, um gás poluente cuja quantidade presente na atmosfera precisa ser bastante reduzida nas próximas décadas, é igual a 1 (já que é o “material” de referência), **os gases da família dos HFC’s** (adicionados à lista de materiais a terem seu uso abolido na Emenda de Kigali, de 2016), que não destroem a camada de ozônio, **podem ter valores de GWP que vão de 12 até mais de 14.000** (quatorze mil) [2].



| Substâncias | | GWP (100 anos) | Vida (anos) |
|------------------------------|------------------|----------------|-------------|
| EMISSIONES DIRETAS | | | |
| CFC | CFC – 11 | 4.660 | 45 |
| | CFC – 12 | 10.600 | 100 |
| | CFC – 115 | 7.670 | 1020 |
| HCFC | HCFC – 22 | 1760 | 11,9 |
| | HCFC – 123 | 79 | 1,3 |
| | HCFC – 124 | 527 | 5,4 |
| HFC | HFC – 32 | 677 | 5,2 |
| | HFC – 125 | 3170 | 28,2 |
| | HFC – 134a | 1300 | 13,4 |
| | HFC – 143a | 4800 | 47,1 |
| | HFC – 152a | 138 | 1,5 |
| EMISSIONES INDIRECTAS | | | |
| | CO ₂ | 1 | ----- |
| | CH ₄ | 28 | 12,4 |
| | N ₂ O | 265 | 121 |

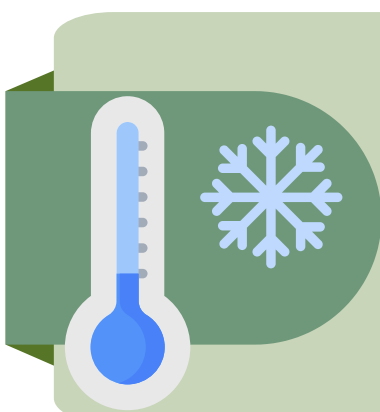
Tabela 1. Lista de emissão de GWP para refrigerantes utilizados no setor de refrigeração. Fonte: Adaptado de IIF-IIR [2]

Ao mesmo tempo, a energia elétrica necessária para fazer funcionar os equipamentos de refrigeração ou de aquecimento ainda é gerada, principalmente, a partir da **queima de combustíveis fósseis** de todo tipo, que sabidamente causam o aquecimento do planeta, uma vez que **resultam na emissão de CO₂**.

Em um esforço mundial para diminuir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e dos SDOs, destinados a abolição, muitos grupos de pesquisa passaram a focar seus esforços para encontrar **soluções alternativas a geração de energia**.

No **campo da refrigeração**, sobre o qual passaremos a dedicar mais atenção daqui em diante neste texto, ideias antigas, que não tinham sido levadas adiante na época de seus idealizadores, passaram a ser reconsideradas como promissoras, já que muitos dos problemas que dificultavam a aplicação prática daquelas tecnologias estavam superados.

Isso se deu graças a uma série de fatores, dos quais podemos citar: **o aprimoramento dos processos de fabricação já conhecidos, o desenvolvimento de novas técnicas de processamento, a descoberta de novos materiais e da rápida automação de toda a cadeia produtiva**, que permitiu que procedimentos complexos, antes realizados manualmente, agora possam ser realizados com segurança, qualidade e rapidez, por máquinas programáveis.



Dentre as ideias que emergiram do passado para serem exploradas no desenvolvimento de novas máquinas de refrigeração, encontravam-se algumas que eram baseadas em um fenômeno que chamamos de **efeito i-calórico**.

Ele é observado quando um material que é colocado sobre a influência de um ou mais campos externos (que pode ser um campo magnético, um campo elétrico, um campo de tensão ou uma combinação deles), sofre **mudança na sua temperatura**.

A depender do campo, o efeito ganha um nome diferente:

- **magnetocalórico** (MC),
- **eletrocalórico** (EC) ou
- **mecanocalórico** (subdivido em **elastocalórico** (eC) e **barocalórico** (BC) e **torsioalórico**).

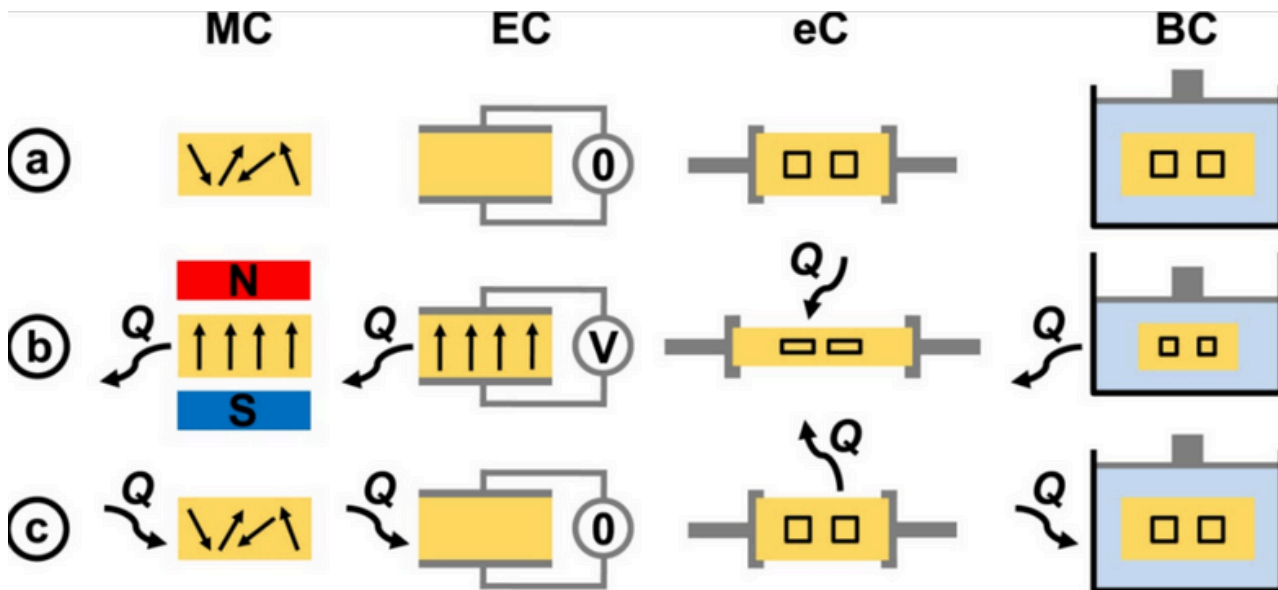


Figura 5. Ilustração esquemática dos efeitos calóricos. Setas retas representam dipolos magnéticos em materiais MC na presença de um ímã, e dipolos elétricos em materiais EC na presença de uma fonte de tensão. Polígonos pretos representam células unitárias em materiais eC conectados por garras, e materiais BC envolvidos por um meio fluido. (a) Ausência campo aplicado, o parâmetro de ordem é zero. Setas onduladas indicam o fluxo de calor subsequente quando (b) materiais calóricos estão sujeitos e (c) ou não sujeitos a ação de um campo externo (em um processo isotérmico). Fonte: Adaptado de Crossley [3]

Na maioria dos casos, quando o material é submetido a um desses campos sua temperatura sobe acima da temperatura ambiente e quando a intensidade do campo diminui até ser nulo, **sua temperatura cai abaixo da temperatura ambiente.**

É claro que a resposta ao **efeito i-calórico**, qualquer um deles, é diferente para diferentes materiais. Então, descobrir materiais que possuíssem um **efeito i-calórico** significativo seria o primeiro passo a ser dado.

Para deixar claro, o termo “significativo” está relacionado com o valor numérico que a temperatura do material pode alcançar quando nele é medido o efeito i-calórico de interesse, mas deve-se ter cuidado ao olhar só para esses números sem levar em consideração outros parâmetros na análise de viabilidade desses materiais. Falaremos sobre isso mais adiante.

Assim como nos refrigeradores convencionais, os **refrigeradores i-calóricos** também precisam ter uma fonte quente e uma fonte fria de calor.

Um detalhe interessante nesses equipamentos é que o **gás refrigerante** (CFC's, HCFC's ou HFC's, por exemplo) pode ser trocado por um **material i-calórico sólido** (ou seja, passaria a ser o refrigerante) e o fluido circulante, que faz o transporte de calor de um lado para outro na máquina pode ser um líquido, como a água, que não é poluente.

Há também a possibilidade do próprio fluido que circula ser um **material i-calórico**, e então a mudança de temperatura observada nos reservatórios frio e quente seria uma combinação dos efeitos no fluido e no **material i-calórico sólido** (Que chamamos de refrigerante).

Por agora, vamos entender como funciona uma **máquina térmica i-calórica**. No nosso exemplo, o equipamento utiliza como refrigerante um material que responde termicamente a um campo magnético. **Este tipo de efeito i-calórico é classificado como “efeito magnetocalórico”**.

A ilustração a seguir representa, de forma esquemática, um **refrigerador magnetocalórico** e faz uma analogia com o **refrigerador convencional** para facilitar o entendimento.

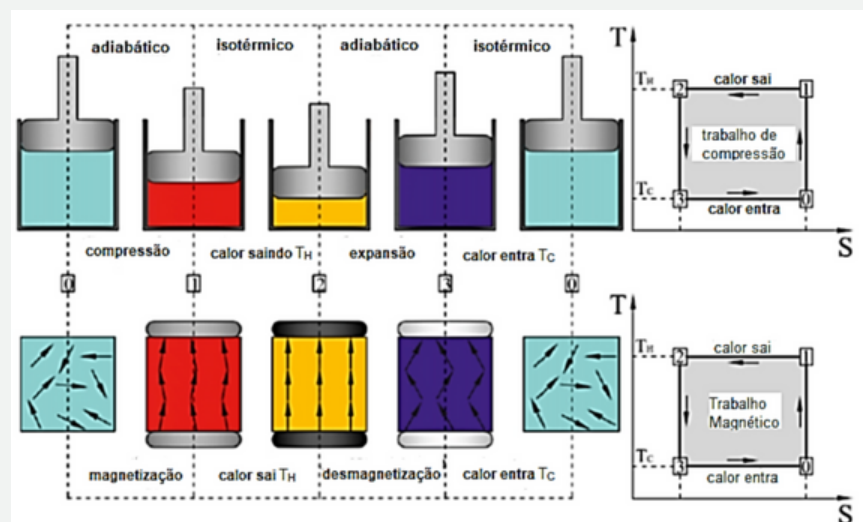
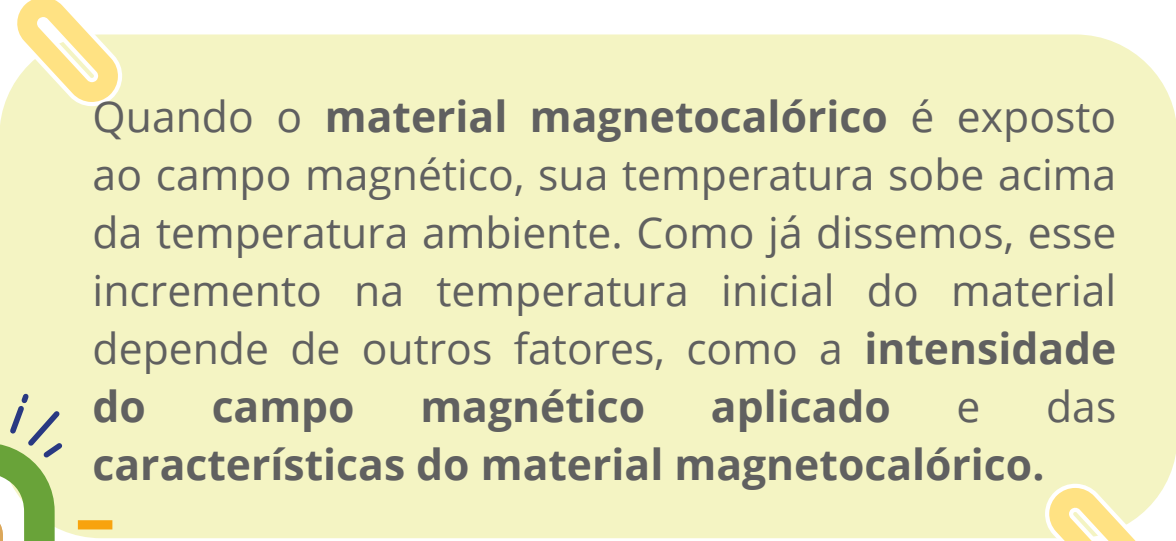


Figura 6. Analogia entre ciclos de Refrigeração: Magnético e Convencional.
Fonte: Adaptado de Russek [4] |

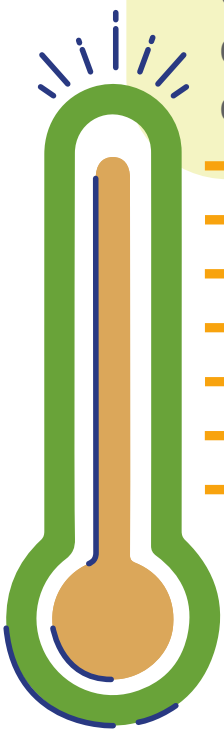
É possível identificar **quatro estágios de funcionamento do equipamento**, assim como numa máquina convencional de refrigeração a gás, apresentada anteriormente.

No primeiro estágio, o **material magnetocalórico** (que atua como o refrigerante) está na temperatura ambiente, sem sofrer a influência do campo magnético que será aplicado sobre ele e sem contato com nenhum elemento em sua vizinhança, incluindo o fluido circulante, que também está na temperatura ambiente.

Geralmente, esse campo magnético é fornecido por um ímã permanente de alto desempenho. Isso evita o uso de eletricidade, necessária para fazer funcionar os **eletroímãs**, uma alternativa aos ímãs permanentes.



Quando o **material magnetocalórico** é exposto ao campo magnético, sua temperatura sobe acima da temperatura ambiente. Como já dissemos, esse incremento na temperatura inicial do material depende de outros fatores, como a **intensidade do campo magnético aplicado** e das **características do material magnetocalórico**.

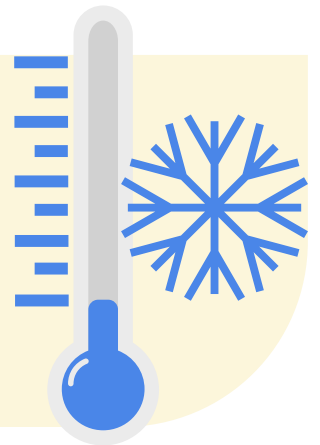


- Em um segundo estágio, o fluido circulante é colocado em contato com o **material magnetocalórico**. Como o fluido está em uma temperatura menor, o material **magnetocalórico** cede calor para ele, aquecendo-o. **Essa é a câmara quente do equipamento.** Como consequência, a temperatura do **material magnetocalórico** volta a se estabilizar próxima à temperatura ambiente.

Nesse ponto, o campo magnético deve ser afastado do **material magnetocalórico**, ao mesmo tempo em que ele novamente se isola de sua vizinhança (estágio 3), de forma semelhante ao que ocorreu no primeiro estágio de funcionamento da máquina. **Com isso, a temperatura do material magnetocalórico cai até abaixo da temperatura ambiente.**

Quando o fluido circulante é posto novamente em contato com o refrigerante (estágio 4), sua temperatura agora é maior e, por isso, cede calor para o **material magnetocalórico**.

Neste momento, passamos para a **câmara fria** do equipamento, e o fluido circulante, que está a uma temperatura abaixo da ambiente, **resfriará os espaços por onde circular até que sua temperatura volte a se aproximar da inicial**, reiniciando todo o processo.



Esse mesmo princípio de funcionamento pode ser estendido aos demais **efeitos i-calóricos**.

Numa máquina que usa, por exemplo, um **material mecanocalórico**, ou seja, que tem sua temperatura alterada quando deformado em uma determinada direção, o que muda é que ao invés de aplicarmos um campo magnético sobre o material refrigerante, aplicamos uma carga mecânica.

No **Grupo de Estudos em Materiais e Máquinas Térmicas (GEMMAT)**, em atividade há mais de 20 anos na UEM e coordenado pelos autores desse capítulo, já foi estudada uma variedade de **materiais magnetocalóricos e mecanocalóricos** com resultados promissores, divulgados em eventos e artigos em revistas científicas.

| Material | κ (Wm ⁻¹ K ⁻¹) | ρ (g/cm ⁻³) | T (K) | C_p (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹) | $-\Delta p$ (GPa) | $ \Delta T $ (K) | $ \Delta S $ (J kg ⁻¹ K ⁻¹) | Ref. |
|-----------------------|----------------------------------------------|------------------------------|-------|----------------------------------------------|-------------------|------------------|----------------------------------------------------|-------|
| PVC _f | 0.13 | 1.88 | 303 | 1.54 | 0.04 | 3.2 | 16.4 | |
| | | | | | 0.13 | 8.1 | 41.6 | |
| | | | | | 0.22 | 12.3 | 62.8 | |
| 40NG/PVC _f | 0.65 | 2.32 | 303 | 1.25 | 0.04 | 2.4 | 9.7 | |
| | | | | | 0.13 | 6.3 | 25.8 | |
| | | | | | 0.22 | 10.0 | 41.2 | |
| 40%NG/PDMS | 0.97 | 1.21 | 293 | 1.12 | 0.05 | 3.1 | 11.5 | [5] |
| | | | | | 0.20 | 11.3 | 42.0 | |
| | | | | | 0.39 | 17.9 | 66.6 | |
| 40%NG/TPU | 0.66 | - | 303 | 1.28 | 0.04 | 1.68 | 7.1 | [6] |
| | | | | | 0.22 | 7.54 | 31.9 | |
| PU | 0.10 | - | 303 | 2.01 | 0.04 | 3.1 | 21.2 | [7] |
| | | | | | 0.22 | 13.1 | 86.8 | |
| | | | | | 0.40 | 21.6 | - | |
| VNR | 0.16 | 0.90 | 293 | 1.83 | 0.04 | 2.8 | 26.0 | [8,9] |
| | | | | | 0.17 | 10.2 | 83.6 | |
| | | | | | 0.39 | 23.9 | 154.4 | |
| NBR | 0.16 | 1.39 | 303 | - | 0.04 | 2.5 | 10.7 | [10] |
| | | | | | 0.17 | 8.6 | 37.7 | |
| | | | | | 0.39 | 15.9 | 58.5 | |
| WTR | 0.21 | 1.24 | 294 | 1.24 | 0.17 | 8.9 | 37.5 | [11] |
| | | | | | 0.39 | 16.1 | 67.9 | |
| | | | | | -0.15 | 9.3 | 60.2* | |
| ASR | 0.20 | 0.96 | 298 | 1.44 | 0.04 | 4.6 | 22.2 | [12] |
| | | | | | 0.17 | 15.5 | 74.2 | |
| | | | | | 0.39 | 41.1 | 198.7 | |

Tabela 2. Propriedades barocalóricas de alguns materiais poliméricos investigados pelo grupo GEMMAT.
Fonte: GEMMAT



Não só isso, mas também alguns dispositivos foram projetados e construídos pelo grupo, o que gerou o **depósito de seis patentes** junto ao **Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI)**, o órgão responsável por avaliar tecnicamente a viabilidade das invenções propostas.

Quando elas são aprovadas, o **INPI concede uma Carta Patente a seus inventores**. Foi o que aconteceu recentemente no caso um **motor termomagnético** que o GEMMAT desenvolveu há alguns anos.

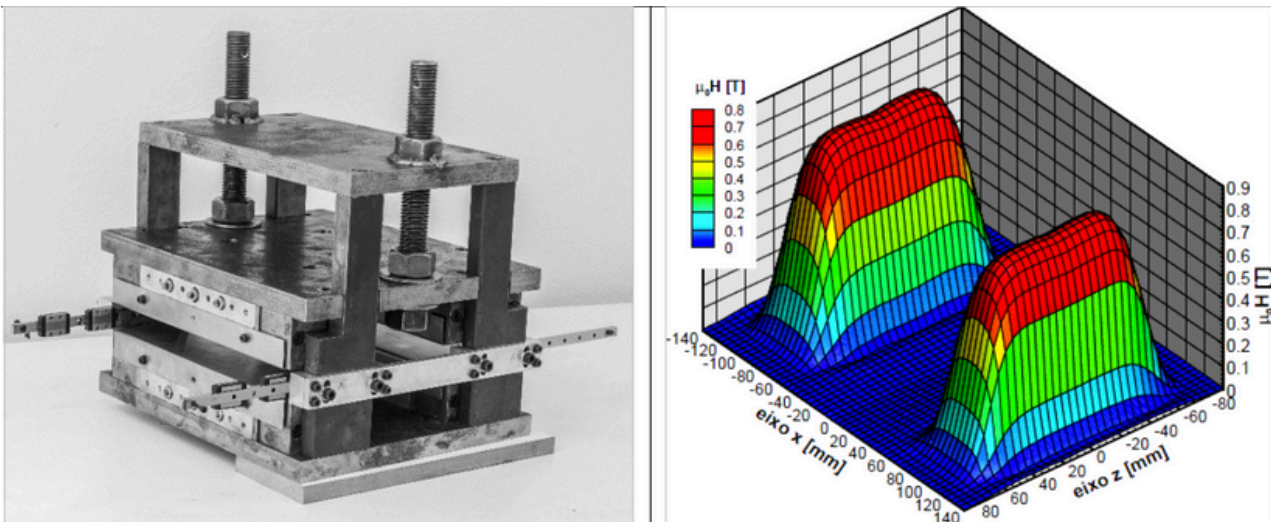


Figura 7 – Motor de Tesla puramente magnético desenvolvido pelo grupo GEMMAT

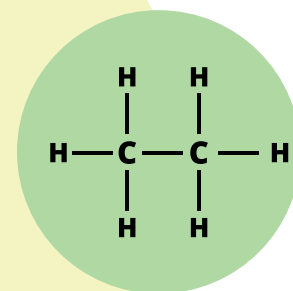
Apesar de fazer uso de nenhum **efeito i-calórico**, o **motor termomagnético** foi resultado de um trabalho desenvolvido em torno de um **material magnetocalórico**, o **gadolínio (Gd)**, que é um elemento metálico da família dos lantanídeos (também conhecido como família das “terras raras”).

Isso deixa claro que a **descoberta de novos materiais não restringe o conhecimento científico** ao tema de estudo para o qual foi originalmente proposto.

Depois de quase vinte anos estudando **materiais magnetocalóricos**, há cinco passamos a investir massivamente na investigação do **efeito mecanocalórico**, especialmente por conta dos custos envolvidos, uma vez que aplicar um carregamento qualquer (tração, compressão ou torção) sobre um **material mecanocalórico** é menos complexo do que aplicar um campo magnético sobre um **material magnetocalórico**.

Além disso, os materiais que respondem termicamente a deformações mecânicas são relativamente mais baratos do que os materiais **magnetocalóricos** ou os materiais **eletrocalóricos** conhecidos.

Atualmente, no GEMMAT - grupo integrante do NAPI-EZC -, estão sendo conduzidos trabalhos sobre **materiais mecanocalóricos pouco convencionais**, como os alcanos (um produto derivado do petróleo) comumente usados como combustíveis e óleos lubrificantes, por exemplo.



Junto com esse trabalho no campo dos materiais, continuamos desenvolvendo equipamentos de medida para a análise das propriedades desses materiais e equipamentos que possam fazer uso do **efeito mecanocalórico** para gerar energia, seja para resfriar ou aquecer ambientes.

Apesar dos muitos **desafios técnicos e científicos** que se apresentam na transição da matriz energética atual, amplamente **baseada no uso de combustíveis fósseis**, para uma matriz com **zero emissão de carbono na atmosfera**, não se deve ignorar o fato de que esse é um **caminho sem volta e que nosso trabalho está em pé de igualdade com o desenvolvido por outros grandes grupos de pesquisa na área, no mundo.**

REFERÊNCIAS

- [1] I. Takeuchi, K. Sandeman, **Solid-state cooling with caloric materials**, *Phys Today* 68 (2015) 48–54. <https://doi.org/10.1063/PT.3.3022>.
- [2] IIF-IIR, M. V., C. D., D.J. L., **The impact of the refrigeration sector on climate change**, 35th Informatory Note on refrigeration technologies., (2017). <https://iifir.org/en/fridoc/the-impact-of-the-refrigeration-sector-on-climate-change-141135> (accessed February 22, 2023).
- [3] S. Crossley, N.D. Mathur, X. Moya, **New developments in caloric materials for cooling applications**, *AIP Adv* 5 (2015) 067153. <https://doi.org/10.1063/1.4922871>.
- [4] S.L. Russek, C.B. Zimm, **Potential for cost effective magnetocaloric air conditioning systems**, *International Journal of Refrigeration* 29 (2006) 1366–1373. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.07.019>.
- [5] W. Imamura, E.O. Usuda, É.S.N. Lopes, A.M.G. Carvalho, **Giant barocaloric effects in natural graphite/polydimethylsiloxane rubber composites**, *J Mater Sci* 57 (2022) 311–323. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06649-9>.
- [6] F.C. Colman, N.D.P. da Silva, W. Imamura, E.O. Usuda, F.R. Moro, A.M.G. Carvalho, C.S. Alves, P.V. Trevizoli, R. de Cássia Colman Simões, J.C.D. de Oliveira, S.L. Favaro, J.R. Bocca, E. Radovanovic, **On the mechanocaloric effect of natural graphite/thermoplastic polyurethane composites**, *J Mater Sci* 58 (2023) 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08700-3>.
- [7] J.R. Bocca, S.L. Favaro, C.S. Alves, A.M.G. Carvalho, J.R. Barbosa, A. dos Santos, F.C. Colman, W.A. dos S. Conceição, C. Caglioni, E. Radovanovic, **Giant barocaloric effect in commercial polyurethane**, *Polym Test* 100 (2021) 107251. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107251>.
- [8] N.M. Bom, W. Imamura, E.O. Usuda, L.S. Paixão, A.M.G. Carvalho, **Giant Barocaloric Effects in Natural Rubber: A Relevant Step toward Solid-State Cooling**, *ACS Macro Lett* 7 (2018) 31–36. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.7b00744>.

REFERÊNCIAS

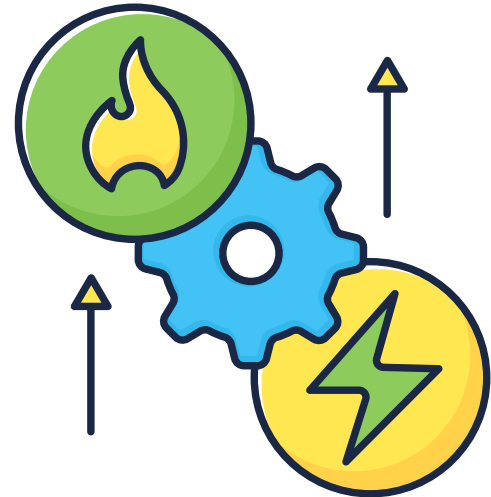
- [9] E.O. Usuda, N.M. Bom, A.M.G. Carvalho, **Large barocaloric effects at low pressures in natural rubber**, Eur Polym J 92 (2017) 287–293. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.05.017>.
- [10] E.O. Usuda, W. Imamura, N.M. Bom, L.S. Paixão, A.M.G. Carvalho, **Giant Reversible Barocaloric Effects in Nitrile Butadiene Rubber around Room Temperature**, ACS Appl Polym Mater 1 (2019) 1991–1997. <https://doi.org/10.1021/acsapm.9b00235>.
- [11] N.M. Bom, É.O. Usuda, M. da Silva Gigliotti, D.J.M. de Aguiar, W. Imamura, L.S. Paixão, A.M.G. Carvalho, **Waste Tire Rubber-based Refrigerants for Solid-state Cooling Devices**, Chinese Journal of Polymer Science 38 (2020) 769–775. <https://doi.org/10.1007/s10118-020-2385-y>.
- [12] W. Imamura, É.O. Usuda, L.S. Paixão, N.M. Bom, A.M. Gomes, A.M.G. Carvalho, **Supergiant Barocaloric Effects in Acetoxy Silicone Rubber over a Wide Temperature Range: Great Potential for Solid-state Cooling**, Chinese Journal of Polymer Science 38 (2020) 999–1005. <https://doi.org/10.1007/s10118-020-2423-9>.

e. Termoelétrica

(Luiz Gustavo Davanse da Silveira)

Termoeletricidade é o fenômeno de **conversão direta e reversível entre energia térmica e energia elétrica** [1].

O termo pode se referir tanto à produção de uma **corrente elétrica** induzida por uma diferença de temperatura entre as extremidades de um material, quanto ao efeito oposto, ou seja, à indução de uma diferença de temperatura causada pela passagem de corrente elétrica.




A **termoeletricidade** é composta por três efeitos distintos que levam os nomes dos cientistas que os descobriram no século XIX: **Seebeck**, **Peltier** e **Thomson**.

A descoberta da **termoeletricidade** está associada a experimentos de condutividade elétrica realizados em um dispositivo hoje chamado de **termopar**. Essencialmente, um **termopar** é formado por **dois condutores elétricos distintos em contato um com o outro apenas por suas extremidades, formando junções**.

Em 1821, o físico alemão Thomas Johann Seebeck observou a existência de um **campo magnético** na vizinhança de um termopar quando suas junções eram mantidas em temperaturas diferentes [2].

À época, **Seebeck** não foi capaz de identificar a origem de tal **campo magnético**. Hoje sabemos que ele é causado por uma corrente elétrica induzida pela diferença de temperatura entre as junções, fenômeno que ficou conhecido como **efeito Seebeck**.



O fenômeno está relacionado ao fato de que portadores de carga em condutores podem se **mover livremente, transportando corrente e calor**. Quando uma diferença de temperatura é estabelecida entre as junções, portadores de carga tendem a se difundir da região quente do material para a região mais fria, produzindo uma **corrente elétrica** [3].

Mesmo que as junções do **termopar** não estejam conectadas entre si por um circuito elétrico fechado, a migração de cargas ocorrerá, e seu acúmulo nas junções produzirá uma voltagem que poderá ser utilizada para manter uma corrente elétrica através de um circuito externo.

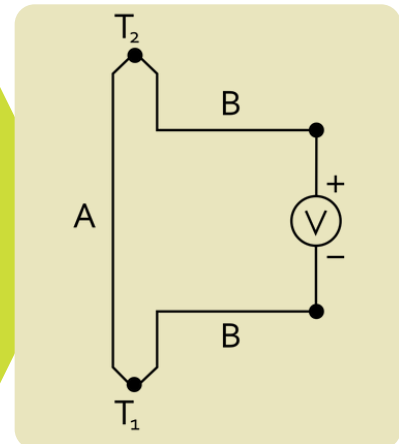
Essa voltagem costuma ser utilizada para quantificar o **efeito Seebeck**, sendo descrita pela equação

$$V = \alpha \Delta T_{(1)}$$

No qual ΔT representa a **diferença de temperatura** entre as junções e α é chamada de **coeficiente Seebeck**, seu valor é dependente dos materiais que formam a junção.

Em 1834, o relojoeiro e físico francês Jean-Charles-Athanase Peltier observou que o **calor produzido pela passagem de corrente elétrica através de uma junção de dois condutores não condizia com o previsto pela lei de Ohm [2].**

Assim como Seebeck, Peltier não foi capaz de explicar as causas de suas observações. Também deixou de identificar uma característica importante do fenômeno, hoje chamado de **efeito Peltier**: calor pode ser emitido ou absorvido pela junção a depender do sentido da corrente elétrica.



Coube a William Thomsom (também conhecido como Lord Kelvin), em 1855, identificar a relação entre os **efeitos Seebeck e Peltier** e, a partir da termodinâmica, estabelecer um tratamento teórico da termoeletricidade [2].

Thomsom mostrou que o calor produzido (ou absorvido) no efeito Peltier é proporcional à intensidade da corrente I , conforme a equação

$$Q_p = \pi I \quad (2)$$

Sendo π o **coeficiente Peltier**. Ele ainda demonstrou teoricamente que os coeficientes Seebeck e Peltier estão relacionados entre si

$$\pi = \alpha T \quad (3)$$

Na qual **T** representa a **temperatura da junção**. Thomson ainda previu a existência de um efeito que leva seu nome: um condutor homogêneo sujeito a uma diferença de temperatura ao longo do seu comprimento e percorrido por uma corrente elétrica absorverá (ou emitirá) uma quantidade de calor proporcional à intensidade e sentido da corrente.

O **efeito Thomson** é descrito pela equação

$$Q_T = \tau I \Delta T \quad (4)$$

Sendo τ o **coeficiente Thomson**.

Propostas de aplicações dos **fenômenos termoeletrônicos** surgiram ainda no século XIX. Em 1826, o físico francês Antoine César Becquerel sugeriu que o **efeito Seebeck** poderia ser utilizado para medição de temperatura [4], ainda hoje esta é a aplicação mais difundida de termopares.

Apenas nas últimas décadas do século XIX, com a expansão da utilização de eletricidade e a crescente demanda por geradores, se considerou a aplicação do **efeito Seebeck** na produção de energia elétrica.

Tal aplicação foi primeiramente explorada pelo físico britânico John William Strutt Rayleigh, que em 1885 calculou a **eficiência do processo de conversão de energia térmica em elétrica** [5,6]. Embora seus resultados estivessem incorretos, seu trabalho inspirou engenheiros e inventores a desenvolverem uma variedade de **dispositivos termoeletrônicos** para a produção de energia elétrica.

Construídos a partir de diversos condutores associados eletricamente em série e termicamente em paralelo, e que exploravam gases e líquidos aquecidos como fontes de calor, tais dispositivos ficaram conhecidos como **geradores termoelétricos**.



A derivação correta da expressão para a eficiência dos **geradores termoelétricos** foi obtida apenas em 1909, pelo físico alemão Edmund Altenkirch [5,6], que ainda identificou as propriedades físicas de materiais que determinam a eficiência da conversão de **energia termoelétrica**.

Em especial, ele descobriu que **geradores termoelétricos eficientes** devem ser formados por **termopares** caracterizados por um **coeficiente Seebeck elevado** (indicando a produção de uma alta voltagem pelo termopar), **baixa resistência elétrica** (minimizando as perdas de energia por efeito Joule) e **baixa condutividade térmica** (permitindo ao material manter uma alta diferença de temperatura) [1,5].

Essas condições são expressas pela chamada figura de mérito termoelétrica, , dada por

$$zT = \frac{\alpha^2}{k\rho} T \quad (5)$$

Sendo K a condutividade térmica, ρ a resistividade elétrica e $T = (T_q + T_f) / 2$, a temperatura média de operação do gerador. Conforme zT aumenta, maior será a eficiência do dispositivo, até que se atinja a **eficiência do ciclo de Carnot**, $1 - T_q / T_f$, para $zT \rightarrow \infty$ [1].

Uma vez que os condutores conhecidos no final do século XIX e início do século XX eram metais, que possuem **baixo coeficiente Seebeck** e **alta condutividade térmica**, os resultados de **Altenkirch** implicavam que os geradores termoelétricos seriam economicamente inviáveis por sua baixa eficiência.



De fato, apesar dos esforços, os primeiros **geradores termoelétricos projetados dificilmente ultrapassavam a barreira de 0,6% de eficiência** [6]. Isto fez com que o estudo da **termoeletricidade** e suas aplicações na produção e energia elétrica fossem paralisados logo no início do século XX.

A perspectiva de se obter **dispositivos termoelétricos eficientes** começa a mudar graças ao físico Russo Abram F. Ioffe, um dos pioneiros na formulação da teoria moderna de semicondutores.

Ioffe percebeu que **semicondutores são termoelétricos muito melhores que metais** e em 1929 publicou seus resultados, apontando que geradores termoelétricos feitos a partir de semicondutores poderiam ter eficiência entre 2,5% e 4% [6].

De fato, em 1940 Yu P. Maslakovets descreveu um **gerador termoelétrico feito de sulfeto de chumbo** (PbS) com eficiência da ordem de 3% [6] e em 1947, a cientista húngara Maria Telkes fabricou um **gerador termoelétrico** que combinava os **semicondutores PbS e ZnSb** capaz de atingir uma eficiência de 5% ao operar em uma diferença de temperatura de 400 °C [5].

Poucos anos depois, em 1954, Hiroshi J. Goldsmid demonstrou o funcionamento de um refrigerador feito a partir de termopares de Bi₂Te₃ [5].



Enquanto isso, ainda na década de 1950, o **primeiro gerador termoelétrico comercial surgiu na União Soviética**. Construído a partir de termopares de ZnSb/Constantan (uma liga metálica formada por cobre e níquel) e alimentado pelo calor de uma lâmpada a querosene, seu principal uso era a alimentação de **aparelhos de rádio em áreas rurais** da Rússia sem acesso à rede elétrica [5].

Apesar do promissor ressurgimento dos **dispositivos termoelétricos** nas décadas de 1940 e 1950, ao final da década de 1960, **geradores e refrigeradores termoelétricos não conseguiram alcançar eficiências superiores a 5%**, sendo abandonados em favor dos mais eficientes equipamentos convencionais [5].

Entretanto, uma vez que **geradores termoelétricos** são dispositivos de estado sólido, **altamente confiáveis, sem partes móveis e, assim, com baixa necessidade de manutenção e baixa probabilidade de falha**, sua utilização é vantajosa em contextos nos quais a robustez do equipamento prevalece sobre outros requerimentos como eficiência e custo.

Este é o caso de **missões espaciais**, um nicho no qual **geradores termoeletricos** se estabeleceram como **fontes de alimentação de instrumentos em satélites e sondas**.



As **mudanças climáticas** trouxeram consigo grande preocupação da comunidade científica quanto aos meios de produção e utilização de energia e suas consequências para o meio ambiente.

É crescente a pressão para que se desenvolvam **meios de produção de energia sustentáveis**, assim como equipamentos mais eficientes. Dispositivos termoeletricos, mesmo os fabricados com os mais avançados materiais e tecnologias disponíveis, ainda estão longe de competirem com geradores, aquecedores e refrigeradores tradicionais.



Porém, quando combinados com outras fontes primárias de geração de energia, proporcionam uma forma de recuperar parcialmente o calor desperdiçado, assim **aumentando a eficiência global de equipamentos**.

Neste contexto, a **tecnologia termoeletrica** tem sido considerada uma **ferramenta para a potencial conversão direta de energia térmica em elétrica** em uma variedade de processos afetados por perdas significativas de energia na forma de calor, como aqueles presentes em usinas, fábricas e até mesmo em veículos com motores à combustão [5].

Por outro lado, **geradores termoelétricos**, diferentemente de geradores convencionais, **podem ser miniaturizados, permitindo o desenvolvimento de microgeradores** que podem explorar pequenas diferenças locais de temperatura para alimentar equipamentos eletrônicos de baixa potência.

Recentes avanços no campo da eletrônica levaram à **redução do tamanho de componentes**, acompanhada de uma redução de seu consumo de energia, chegando ao intervalo de mW a μW .

Deste modo, muito **sistemas eletrônicos complexos como sensores e atuadores wireless** já podem funcionar com baterias e geradores locais, como **pequenos painéis fotovoltaicos**.



Neste contexto, **microgeradores termoelétricos** podem se estabelecer como alternativas ou como elementos complementares para a alimentação de dispositivos. Para este propósito, já foram fabricados **microgeradores termoelétricos com termopares baseados em Bi_2Te_3** capazes de fornecer até 17 mW/cm^2 sob diferenças de temperatura de $75 \text{ }^\circ\text{C}$ [7].



Com o crescimento de potenciais campos de aplicação, a implementação prática e sustentável da tecnologia termoelétrica enfrenta um grande desafio: **o desenvolvimento de materiais com alto desempenho e atóxicos**. Os materiais atualmente usados em dispositivos comerciais como telúrio, chumbo e germânio são raros e/ou tóxicos, assim, não podem ser considerados para produção em massa.

Geradores Termoelétricos

A **Figura 1** mostra um **esquema do funcionamento de um gerador termoelétrico**. Uma diferença de temperatura é estabelecida entre as junções, chamadas de junção quente e junção fria, de dois materiais metálicos ou semicondutores distintos.

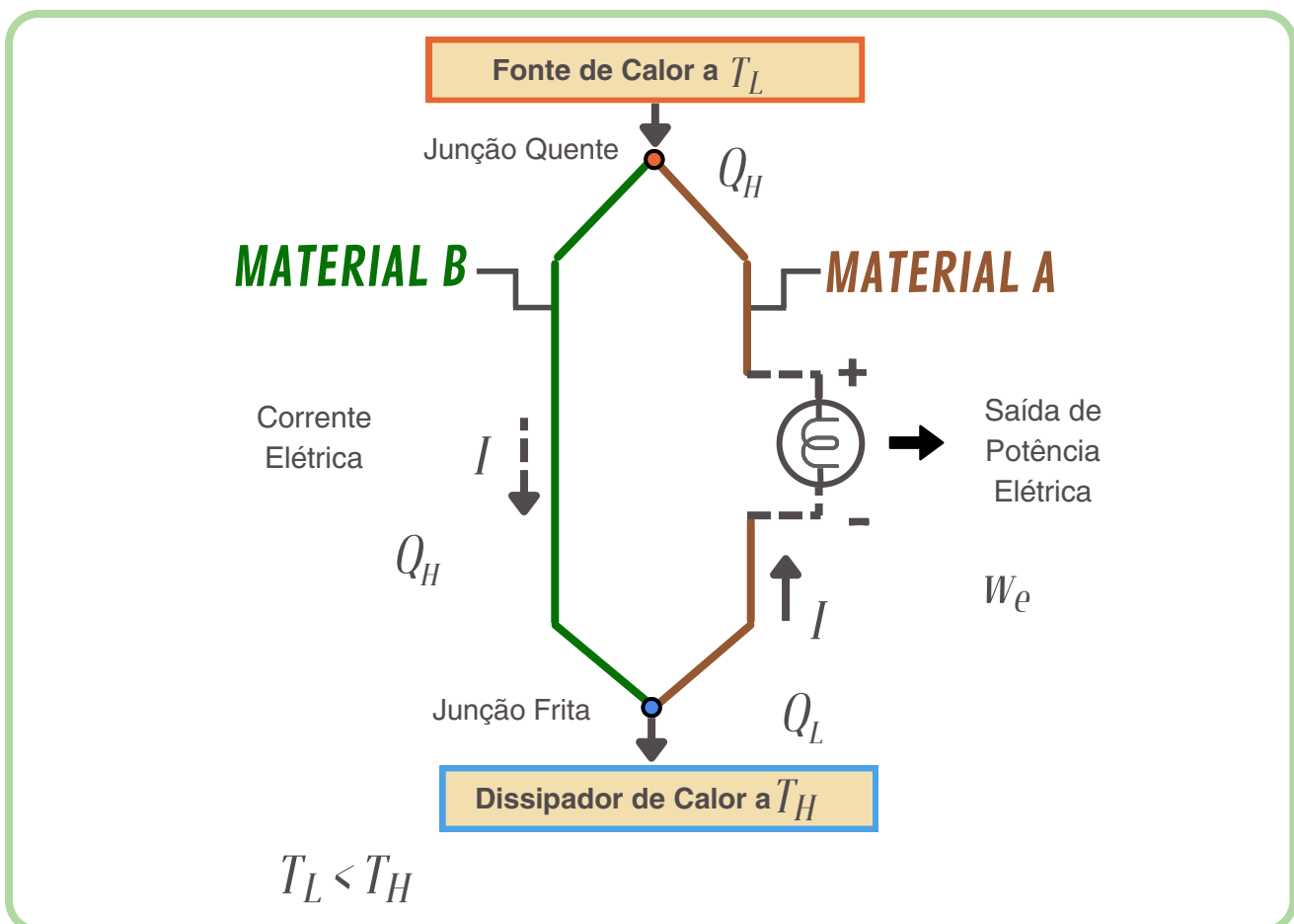


Figura 1 – Diagrama esquemático ilustrativo dos princípios de funcionamento de um gerador termoelétrico [8].

Devido a essa diferença de temperatura, uma voltagem é produzida pelo **efeito Seebeck**. Em um gerador básico, como o ilustrado, a fonte quente, mantida à temperatura T_H , fornece calor à junção quente a uma taxa Q_H . O calor, então, se propaga pelos materiais termoelétricos A e B até atingir a junção fria, mantida à temperatura T_L , sendo dissipado pela fonte fria a uma taxa Q_L .

A transferência de calor faz com que uma corrente elétrica percorra o circuito, de acordo com o **efeito Seebeck**, e uma potência elétrica é entregue a qualquer equipamento ligado ao gerador.

Este processo constitui um **ciclo termodinâmico**, de modo que o **gerador termoelétrico** é, de fato, uma máquina térmica na qual os portadores de carga constituem o fluido de trabalho. Como em toda máquina térmica, a potência fornecida pelo gerador, W_e , será a diferença entre Q_H e Q_L , de acordo com a **primeira lei da termodinâmica**.

Normalmente, um único termopar não é capaz de fornecer potência suficiente para aplicações práticas. Sendo assim, em um dispositivo termoelétrico, diversos termopares são, geralmente, conectados termicamente em paralelo e eletricamente em série. **Essa configuração costuma ser chamada de módulo.**

A **Figura 2** ilustra uma das possíveis montagens de um módulo termoelétrico. O dispositivo é composto por **duas placas cerâmicas** (substratos) que servem como fundação, provendo integridade mecânica e isolamento elétrico dos semicondutores tipo n (altamente dopados para criar um excesso de elétrons) e semicondutores tipo p (altamente dopados para criar uma escassez de elétrons).

As cerâmicas introduzem uma **resistência térmica** no dispositivo, dificultando as trocas de calor, no entanto, sua remoção resultaria em um dispositivo mecanicamente frágil.

A alumina (Al_2O_3) é o **material cerâmico mais utilizado em módulos termoeétricos**, mas materiais com maior condutividade térmica como **berília** (BeO) e **nitreto de alumínio** (AlN) podem ser empregados se uma maior transferência de calor for necessária.

As junções entre os semicondutores são feitas por **fitas de metal altamente condutor** (cobre, por exemplo). A potência de um gerador termoeétrico comercial pode variar de microwatt até dezenas de quilowatts [9,10].

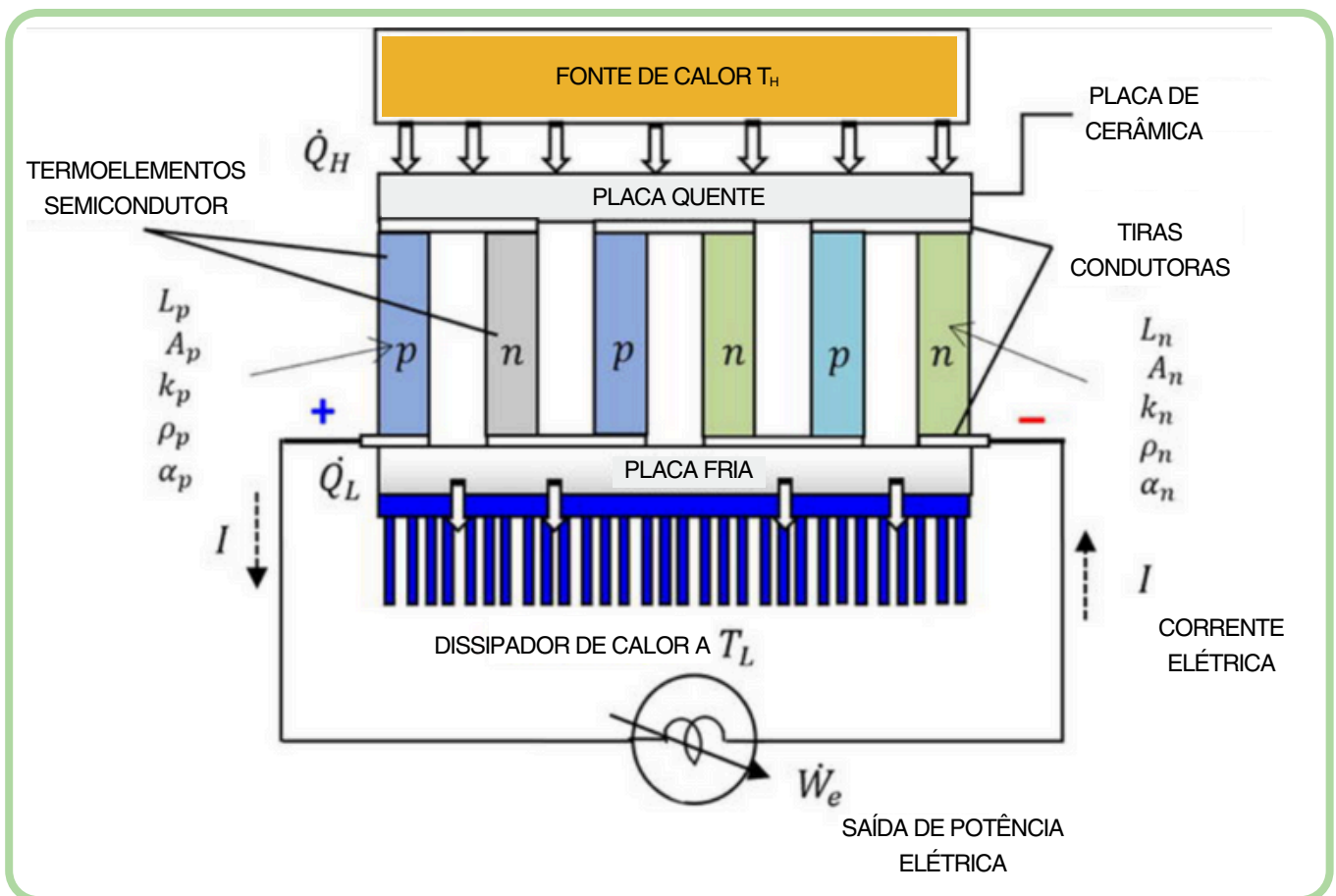


Figura 2 – Diagrama esquemático ilustrando a montagem básica de um dispositivo termoeétrico [8].

Os semicondutores tipo n e tipo p, que constituem os **termopares**, são os elementos que mais criticamente determinarão o desempenho de um **módulo termoeétrico**.

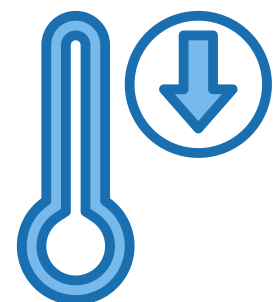
Dentre as propriedades mais importantes visando-se aplicações em geradores termoelétricos estão o **coeficiente Seebeck**, a **condutividade térmica** e a **resistividade elétrica**. Conjuntamente, essas três propriedades definem a figura de mérito **zT** , conforme a equação (5).

A figura de mérito pode ser interpretada como uma forma de **mensurar o potencial termoelétrico de um material**: quanto maior seu valor, mais eficiente o material será na conversão de energia térmica em energia elétrica.

A **Tabela 1** apresenta alguns dos materiais mais comumente utilizados em geradores, acompanhados de seus respectivos valores de **zT** e do intervalo de temperatura ótimo de operação. Propriedades auxiliares como **resistência mecânica, estabilidade química e coeficiente de expansão térmica** também devem ser observadas.

Além disso, parâmetros relacionados à construção do dispositivo, como geometria e dimensão dos semicondutores, espaçamento entre os termopares e a resistência elétrica do contato entre semicondutor e metal, terão influência sobre a eficiência efetiva do gerador.

Em baixas temperaturas (abaixo de 150 °C), o **telureto de bismuto** (Bi_2Te_3) e compostos derivados são os materiais mais utilizados comercialmente por possuírem valores de zT dentre os mais elevados já observados.



Uma desvantagem desses materiais está na escassez do telúrio e na relativa toxicidade tanto do bismuto quanto do telúrio, o que impõe limitações do ponto de vista econômico, ambiental e de saúde pública à produção em massa desses compostos.

Em anos recentes, **semicondutores orgânicos** (polímeros e materiais baseados em nanotubos e grafeno) e o silício têm atraído interesse como alternativas ao telureto de bismuto. Os semicondutores orgânicos têm como **vantagem o fato de serem constituídos por elementos leves e abundantes** que, a princípio, poderiam ser obtidos a partir de fontes renováveis.

Além disso, os métodos de produção de polímeros são facilmente escaláveis para a fabricação em massa e o fato desses materiais serem, usualmente, leves e flexíveis possibilitaria novos projetos e aplicações de geradores termoelétricos, como em dispositivos vestíveis.

O **silício**, por sua vez, é a base da eletrônica moderna, portanto, **módulos termoelétricos baseados nele seriam facilmente integrados a dispositivos eletrônicos atuais**. Em ambos os casos, os baixos valores de zT mantêm essas alternativas ainda distantes de aplicações comerciais.



O **telureto de chumbo**, PbTe, foi um dos primeiros materiais empregados em aplicações práticas em **geradores termoelétricos**, ainda hoje, juntamente com compostos derivados, se mantém como material padrão em dispositivos que operam no intervalo intermediário de temperatura, entre 150 °C e 700 °C.

Assim como ocorre com o **telureto de bismuto**, as principais desvantagens do telureto de chumbo estão relacionadas à escassez e toxicidade de seus elementos constituintes.

Recentemente, o **seleneto de estanho**, SnSe, tem sido considerado uma **alternativa promissora**, por se tratar de um material formado por elementos atóxicos e abundantes, além de seu alto desempenho termoelétrico observado em laboratório. SnSe dopado com sódio (tipo p) apresenta **$zT=1,34$** no intervalo de temperatura entre 27 °C e 500 °C, enquanto a dopagem com bromo (tipo n), resulta em um material com **zT** máximo de 2,8 a 500 °C.

Entretanto, esse desempenho excepcional foi observado em **monocristais do material**, cujo processamento é complexo e lento, portanto, difícil de ser adaptado para a escala industrial.

Outros candidatos promissores são os materiais isoestruturais ao mineral escuterudita (CoAs_3), como $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$ e CoSb_3 .

De processamento mais simples que o seleneto de estanho, as **escuteruditas oferecem a possibilidade de uma ampla gama de alteração de sua composição química**, por meio da inclusão e substituição de elementos, permitindo o controle de suas propriedades físicas em busca de um desempenho termoelétrico otimizado.

Contudo, a **estabilidade mecânica** e **reatividade** com o oxigênio em altas temperaturas, além da **disparidade entre os coeficientes de expansão térmica** de materiais tipo n e tipo p são fatores que **influenciam negativamente o desempenho** e atualmente previnem uma ampla utilização das escuteruditas em módulo termoelétricos.

Em altas temperaturas, acima de 700 °C, ligas de SiGe apresentam os maiores valores de ***zT***. Atualmente, diversos materiais óxidos termoelétricos são conhecidos com valores de ***zT*** próximos de 1. Um exemplo são os óxidos metálicos de formula química geral A_xMO_2 ($A = Na, K; M = Cr, Mn, Co; 0 < x < 1$).

A estrutura cristalina em camada resulta em uma **alta condutividade elétrica e relativamente baixa condutividade térmica**. Óxidos são interessantes, particularmente para aplicações em altas temperaturas, por serem materiais altamente estáveis do ponto de vista térmico, mecânico e químico.

Além disso, **óxidos metálicos** são, em geral, formados por **elementos abundantes e podem ser produzidos em grandes quantidades**. A baixa mobilidade das cargas, intrínseca dessa classe de materiais, entretanto, constitui a maior barreira limitadora do seu desempenho termoelétrico.

| Temperatura de Operação | Material | Tipo | zT máximo |
|-------------------------|------------------------|------|-------------|
| <150 °C | $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$ | p | 1,4 |
| | $Bi_2Se_{0,3}Te_{2,7}$ | n | 1,0 |
| | Bi_2Te_3 | n, p | 0,8 |
| 150 °C – 500 °C | PbTe | n, p | 0,8 |
| | TeAgGeSb | p | 1,2 |
| 500 °C – 700 °C | $CeFe_4Sb_{12}$ | p | 1,1 |
| | $CoSb_3$ | n | 0,8 |
| 700 °C – 900 °C | SiGe | n, p | 0,6 – 1,0 |
| | LaTe | p | 0,4 |

Tabela 1 – Materiais semicondutores utilizados em geradores termoelétricos e suas características. Adaptada da referência [11].

Aplicações

Geradores termoeletricos operam a partir de diferenças de temperatura.

Considerando que a fonte fria usualmente será a atmosfera, a princípio, um módulo termoeletrico poderia ser acoplado a qualquer fonte de calor para produzir eletricidade.

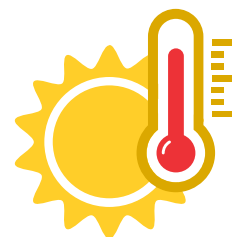


Os primeiros protótipos de geradores termoeletricos, que datam ainda do século XIX, utilizavam o **calor de fornalhas alimentadas pela queima de carvão, madeira ou gás.**

Embora **geradores convencionais sejam mais eficientes na produção de eletricidade** a partir da combustão de combustíveis fósseis ou de biomassa, o **fato de geradores termoeletricos não contarem com partes móveis e serem capazes de funcionar por longos períodos sem manutenção, os tornam apropriados para aplicações de nicho.**

Um exemplo é a utilização de **módulos termoeletricos na alimentação de sistemas de proteção catódica**, utilizados na prevenção de corrosão em oleodutos e gasodutos [12]. Esses sistemas, que funcionam a partir da **queima de gás natural**, são instalados em locais remotos ou de difícil acesso, como plataformas marítimas, grandes altitudes e proximidades de poços de gás.

Também no século XIX propôs-se a utilização do **calor do sol** para alimentar geradores termoeletricos.



Os projetos envolviam **sistemas de lentes e espelhos** que concentravam a luz solar na junção quente do gerador, assim maximizando a temperatura obtida. Esse conceito continua a ser explorado ainda hoje.

Em 2010, um grupo de pesquisadores construiu um protótipo utilizando um pequeno módulo termoelétrico comercial baseado em Bi_2Te_3 e um sistema óptico formado por uma lente de Fresnel e um espelho parabólico para concentrar a luz solar.

O sistema foi capaz de produzir 1,8 W de potência com 3% de eficiência de conversão de energia [13]. Ainda hoje, esses são os maiores valores observados para esse tipo de dispositivo.

Em outra vertente, pesquisadores buscam **desenvolver sistemas híbridos**, incorporando módulos termoelétricos a sistemas solares de aquecimento de água e em painéis fotovoltaicos.



Esse segundo caso é particularmente interessante, uma vez que **o infravermelho presente no espectro de radiação solar não contribui para a conversão fotovoltaica** (em painéis convencionais), provocando apenas o aquecimento dos painéis que poderia ser aproveitado para alimentar módulos termoelétricos, assim aumentando a eficiência global do painel. Em um estudo de 2012, mostrou-se que esse **aumento de eficiência pode chegar a cerca de 1,5%** [14].

A partir da década de 1960, **termoelétricos** foram amplamente utilizados para converter o calor produzido pelo decaimento de radioisótopos (geralmente ^{238}Pu) diretamente em eletricidade em dispositivos que ficaram conhecidos como baterias atômicas. A principal aplicação desses dispositivos foi como fonte de eletricidade em missões espaciais.

O primeiro gerador termoelétrico de radioisótopo foi lançado ao espaço pela Nasa, para teste, a bordo da nave Transit 4A, em 1961.



Até 2010, a agência espacial americana havia embarcado esses geradores em **26 sistemas espaciais**, como por exemplo, as missões **Voyager** (em 1977), **Galileo** (em 1989), **Ulysses** (em 1990), **Cassini** (em 1997), **New Horizons** (em 2006) e o robô **Curiosity** que opera na superfície de Marte desde 2012.

Geradores termoelétricos de radioisótopo também foram utilizados para alimentar instrumentos em lugares remotos, como faróis, balizas náuticas e estações meteorológicas. Esse tipo de utilização foi abandonado na década de 1990, devido às questões de **segurança relativas aos elementos radioativos** contidos nos geradores.



As **baterias atômicas** tiveram ainda aplicação médica em **marcapassos**, por serem fontes de alimentação robustas e de longa vida útil, até serem substituídas pelas baterias de lítio.

O corpo humano libera 100 W de calor em repouso e 525 W durante atividades físicas [15]. Essa energia poderia ser convertida em eletricidade para alimentar dispositivos portáteis.



O desenvolvimento de **geradores termoeletrônicos** para o **aproveitamento do calor corporal** está em andamento desde o final do século XX. Entre 1998 e 2001, as fabricantes Seiko e Citizen lançaram **relógios de pulso movidos a geradores termoeletrônicos**, obtendo relativo sucesso comercial [16].



O modelo da Seiko era equipado com um módulo termoeletrônico com semicondutores de telureto de bismuto capaz de **prover uma potência elétrica de 22 μ W** e voltagem de 300 mV, tendo eficiência de 0,1% [17].

A **baixa eficiência** dos módulos termoeletrônicos fez com que a tecnologia fosse abandonada em favor de modelos equipados com células fotovoltaicas ou geradores cinéticos (que produzem eletricidade a partir do movimento do usuário).

Com o crescente **mercado de dispositivos portáteis e vestíveis**, há grande incentivo ao desenvolvimento de **geradores termoeletrônicos** como alternativa às baterias para a alimentação desses equipamentos.

Existem, no entanto, **diversas barreiras que precisam ser superadas** para tornar a aplicação dos termoeletrônicos uma realidade nesse segmento. Os semicondutores mais utilizados em módulos termoeletrônicos são rígidos, o que pode tornar o **dispositivo desconfortável de utilizar**, além de dificultar a maximização do contato entre o módulo e a pele do usuário.

Além disso, esses materiais **usualmente contêm elementos tóxicos em sua composição**, o que requer que medidas adicionais sejam tomadas no projeto do dispositivo para garantir que a saúde do usuário não seja afetada.

Semicondutores orgânicos e compósitos são candidatos promissores para essa categoria de aplicação, por serem flexíveis e atóxicos. As desvantagens desses materiais estão nos valores baixos da figura de mérito e na sua instabilidade química em contato com o ar [18].

Considerando todo o ciclo de produção, distribuição e utilização de energia, **cerca de 2/3 do total é desperdiçado devido às ineficiências inerentes aos processos**. Grande parte dessa energia se perde na forma de calor, que poderia ser recuperado e convertido em eletricidade por geradores termoelétricos.

Segundo um estudo de 2006 promovido pelo departamento de energia dos EUA, **cerca de 1/3 da energia consumida pelo setor industrial americano é perdida na forma de calor para a atmosfera ou em sistemas de refrigeração**.



Estima-se que entre **0,9 TWh e 2,8 TWh de energia poderia ser recuperada anualmente** a partir do calor rejeitado na indústria **utilizando materiais termoelétricos** com valores de entre 1 e 2 [19].

O setor de transportes também constitui uma grande fonte de calor rejeitado. Cerca de 2/3 da energia produzida em um motor a combustão convencional são perdidos na forma de calor, 40% dele associado aos gases de exaustão [20]. **Estima-se que a recuperação de 6% do calor dos gases de exaustão pode acarretar em um consumo de combustível de cerca de 10% [21].**

Desde a década de 1980, diversos projetos de integração de **geradores termoelétricos** em veículos foram conduzidos por várias montadoras em parceria com agências governamentais e universidades [22]. Alguns desses estudos resultaram em **geradores capazes de entregar cerca de 1 kW de potência em laboratório.**



No entanto, as potências registradas em testes práticos, empregando condições normais de dirigibilidade, são muito menores, resultando em uma economia de combustível entre 1% e 2% [22].

Em 2013, os laboratórios de pesquisa da Fiat publicaram os resultados de um estudo de caso no qual o gerador termoelétrico foi integrado a um caminhão IVECO Daily com motor diesel de 2,3 litros. **A economia de combustível reportada foi de 4%, o melhor resultado conhecido até hoje [23].**

Os principais desafios a serem vencidos nessa categoria de aplicação são a **baixa eficiência** dos geradores termoelétricos, **capacidade de absorção de calor** insuficiente, **distribuição não-uniforme** de temperatura nos exaustores e o **espaço limitado** para instalação dos geradores [22].

Embora a pesquisa sobre a utilização de geradores termoeletricos em veiculos tenha sido focada em carros e caminhões, o conceito é transferível para motocicletas, aviões e embarcações.

Cabe ainda dizer que **módulos termoeletricos podem ser utilizados como refrigeradores** (ou aquecedores), utilizando o **efeito Peltier**. Esta é, inclusive, a principal aplicação de módulos comerciais.

Refrigeradores termoeletricos são utilizados no resfriamento de componentes eletrônicos, instrumentos científicos e medicamentos.

As **vantagens dos refrigeradores termoeletricos** são a **ausência de fluido refrigerante** e de **partes móveis**, o que elimina a produção de vibrações e ruídos, oferecem a possibilidade de **miniaturização e um controle preciso de temperatura**. Assim como os geradores, os refrigeradores sofrem de baixa eficiência e alto custo.

Conclusão

Geradores termoeletricos são dispositivos que podem converter energia térmica diretamente em energia elétrica. As principais vantagens desses dispositivos sobre geradores convencionais são:

- **tamanho compacto,**
- **confiabilidade**
- **e baixa necessidade de manutenção.**

Essas características fazem com que **geradores termoeletrônicos** sejam aplicáveis em uma variedade de cenários, como para a produção de eletricidade em **localidades remotas ou inacessíveis**, na alimentação de **dispositivos portáteis e sensores autônomos**, além de oferecerem a importante possibilidade de **recuperação do calor desperdiçado** em diversos processos de produção e utilização de energia.

Entretanto, a aplicação prática de **geradores termoeletrônicos** ainda encontra sérias dificuldades, como a **baixa eficiência e o alto custo**. Para superar essas limitações, a descoberta e o desenvolvimento de novos materiais termoeletrônicos com valores elevados da figura de mérito são essenciais.

Esse, portanto, tem sido, e deverá permanecer como o foco de grande parte das pesquisas realizadas sobre essa classe de materiais.

REFERÊNCIAS

- [1] GADEA, Gerard; MORATA, Alex; TERANCON, Albert. **Semiconductors and Semimetals** **98**, 2018, pp. 321-407.
<https://doi.org/10.1016/bs.semsem.2018.01.001>
- [2] HARPSTER, Joseph. W.; STROHL, G. Ralph. **"thermoelectric power generator."** **Encyclopedia Britannica**, June 10, 2024.
<https://www.britannica.com/technology/thermoelectric-power-generator>.
- [3] LU, Kathy. **Materials in energy conversion, harvesting, and storage**. John Wiley & Sons, 2014.
- [4] HUNT, L. B.. **Platinum Metals Review** 8, 1964, pp. 23 - 28.
<https://doi.org/10.1595/003214064X812328>

REFERÊNCIAS

- [5] BERETTA, Davide; NEOPHYTOU, Neophytos; HODGES, James M.; KANATZIDIS, Mercouri G.; NARDUCCI, Dario; MARTIN-GONZALEZ, Marisol; BEEKMAN, Matt; BALKE, Benjamin; CERRETTI, Giacomo; TREMEL, Wolfgang; ZEVALKINK, Alexandra; HOFMANN, Anna I.; MÜLLER, Christian; DÖRLING, Bernhard; CAMPOY-QUILES, Mariano; CAIRONI, Mario. **Materials Science and Engineering R** **138**, 2019, pp. 210 – 255. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.09.001>
- [6] IOFFE, A. F. **Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling**. Infosearch Limited, Londres, 1957.
- [7] BERETTA, D.; MASSETTI, M.; LANZANI, G.; CAIRONI, M. **Thermoelectric characterization of flexible micro-thermoelectric generators**. Rev. Sci. Instrum. 1 January 2017; 88 (1): 015103. <https://doi.org/10.1063/1.4973417>
- [8] ISMAIL, B. I. Abed; ABED, J. H. Ismail. **'Fundamental Aspects and Advances in Thermoelectric Materials for Power Generation: A Numerical Simulation Case Study', New Materials and Devices for Thermoelectric Power Generation**. IntechOpen, Oct. 31, 2023. doi: 10.5772/intechopen.1003096.
- [9] PICHANUSAKORN, Paothep; BANDARU, Prabhakar. **Materials Science and Engineering: R: Reports** 67, 2010, pp. 19 – 63. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2009.10.001>
- [10] HE, Jian; TRITT, Terry M. **Science** **357**, 2017, pp. 1369. DOI: 10.1126/science.aak9997
- [11] Ding, L. C.; Akbarzadeh, A.; Tan, L. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 81, 2018, pp. 799 – 812. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.010>
- [12] FAR WEST CORROSION. **Thermoelectric generators for cathodic protection by Gentherm**. Disponível em: <https://www.farwestcorrosion.com/thermoelectric-generators-for-cathodic-protection-by-gentherm.html>

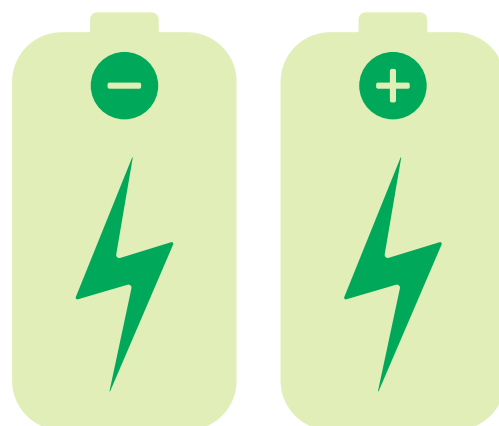
REFERÊNCIAS

- [13] Amatya, R., Ram, R.J. J. **Electron. Mater.** 39, 1735–1740 (2010).
<https://doi.org/10.1007/s11664-010-1190-8>
- [14] Mizoshiri, M.; Mikami, M.; Ozaki, K. Jpn. J. Appl. **Phys.** 2012, 51, 06FL07.
DOI 10.1143/JJAP.51.06FL07
- [15] Bhatnagar, V.; Owende, P. **Energy Sci. Eng.** 2015, 3, 153–173.
<https://doi.org/10.1002/ese3.63>
- [16] PLUS9TIME. **Body heat powered watches: Seiko Thermic.**
<https://www.plus9time.com/blog/2020/5/30/body-heat-powered-watches-seiko-thermic>
- [17] ENCYCLOPEDIA. **Encyclopedia.** Disponível em:
<https://encyclopedia.pub/entry/1682>
- [18] Soleimani, Z.; Zoras, S.; Ceranic, B.; Shahzad, S.; Cui, Y. Sustain. **Energy Technol. Assess.** 2020, 37, 100604. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100604>
- [19] https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/industries_technologies/imf/pdfs/teg_final_report_13.pdf
- [20] Yu, C.; Chau, K.T. **Energy Convers. Manag.** 2009, 50, 1506–1512.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.02.015>
- [21] Vázquez, J.; Sanz-Bobi, M.A.; Palacios, R.; Arenas, A. **State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles.** In Proceedings of the 7th European Workshop on Thermoelectrics, Pamplona, Spain, 3–4 October 2002.
- [22] Shen, Z.-G.; Tian, L.-L.; Liu, X. **Energy Convers. Manag.** 2019, 195, 1138–1173. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.087>
- [23] AUTOMOTIVE IQ. Case study: **Fiat, the first light commercial vehicle.**
<https://www.automotive-iq.com/thermal-management/articles/case-study-fiat-the-first-light-commercial-vehicle>

f. Triboelétrica

(Luiz Gustavo Davanse da Silveira)

O **efeito triboelétrico** consiste na **transferência de cargas elétricas entre dois materiais diferentes em contato** (ou, mais comumente, atritados um contra o outro), resultando em objetos eletrificados: o material que ganha cargas ficará negativamente carregado enquanto o material que perde cargas fica positivamente carregado.



Este fenômeno é conhecido desde a antiguidade e, possivelmente, foi o **primeiro fenômeno elétrico reconhecido como tal pela humanidade**.

Por volta do ano 600 A.C., o filósofo grego Tales de Mileto relatou que o **âmbar** (uma resina fossilizada) **ao ser atritado contra peles de animais**, se tornava capaz de **atrair partículas leves como sementes e pedaços de palha**.

De fato, a palavra grega para âmbar é “**elektron**”, dela derivam os termos “eletricidade” e o nome da partícula elementar “**elétron**”.

Apesar da longa história de observação do fenômeno, seu entendimento ainda hoje é incompleto. As cargas transferidas entre as superfícies de dois objetos em contato podem estar associadas a **transferências de elétrons, íons e até mesmo à aderência de partículas de um material ao outro**. O tipo de partícula transferidas, assim como os mecanismos responsáveis pela transferência de cargas, dependerá da natureza dos materiais em contato.

Além disso, um grande número de fatores, tais como **eletroafinidade, eletropositividade, rugosidade superficial e topografia local** afetarão o sentido e a magnitude da transferência de cargas [1].

A afinidade por cargas de um material é por vezes chamada de “**triboeletricidade**” e a carga transferida por contato é chamada de “carga triboelétrica”.

Uma vez que muitos fatores se entrelaçam na determinação da **triboeletricidade** de um objeto, os pesquisadores desenvolveram um ordenamento empírico de materiais, de acordo com sua habilidade de ganhar ou perder cargas, chamado de **série triboelétrica**.

A **figura 1** apresenta um exemplo de **série triboelétrica** contendo materiais comuns, mas a série pode ser expandida indefinidamente para incluir todos os tipos de materiais, como metais, cerâmicas e polímeros.

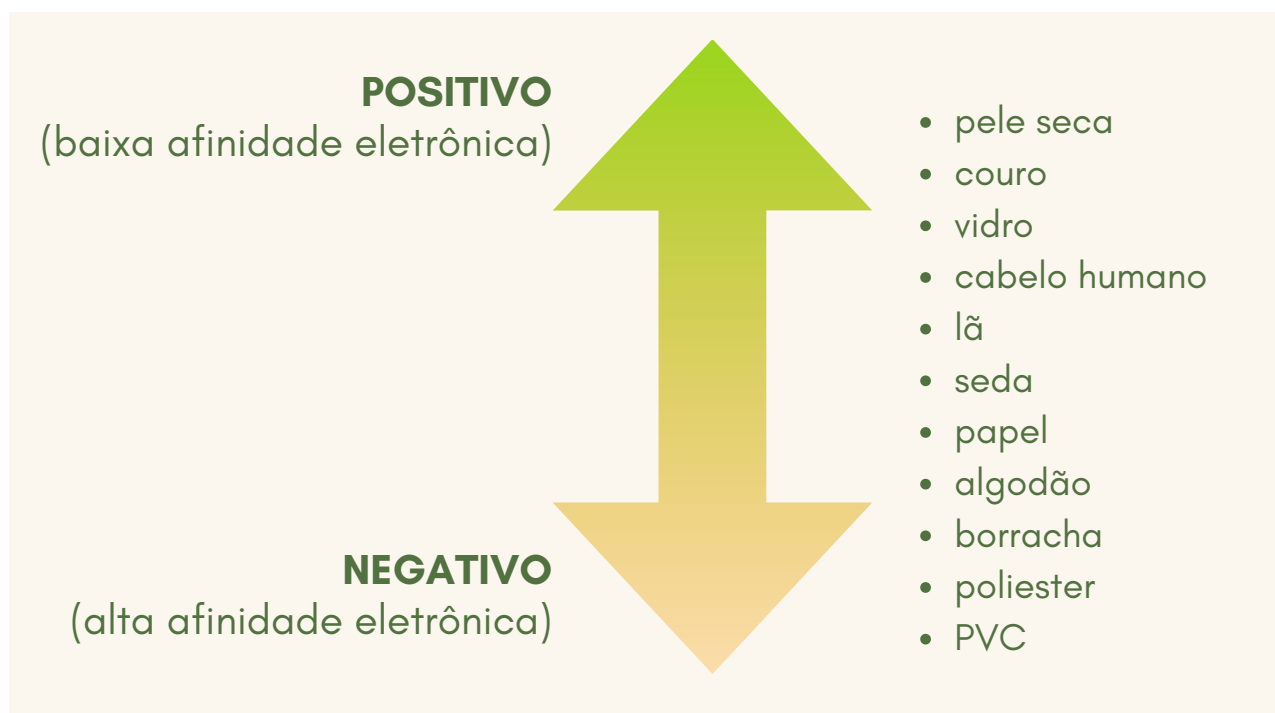
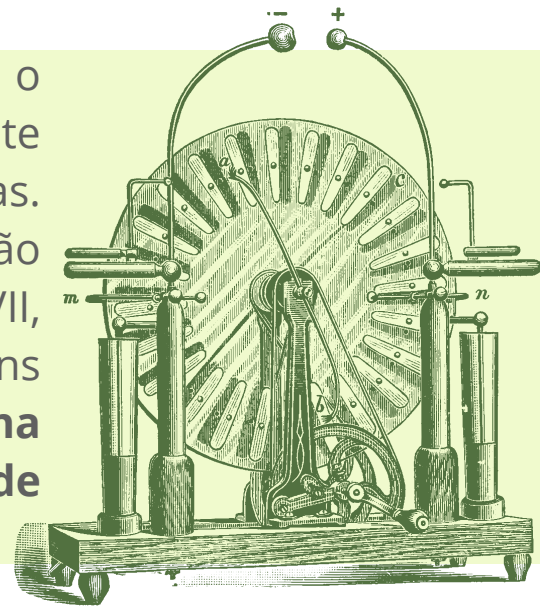


Figura 1 – Série triboelétrica

Materiais localizados na região positiva da série, chamados de **tribo-positivos**, tendem a perder cargas em contato com outros materiais, enquanto os materiais na região negativa, chamados de **tribo-negativos**, tendem a ganhar cargas.

Quanto maior for a separação entre materiais na série triboelétrica, maior tende a ser a transferência de cargas entre eles.

A **eletrização por atrito**, outro nome para o **efeito triboelétrico**, foi utilizada durante séculos na produção de cargas eletrostáticas. Projetos de **geradores eletrostáticos** são desenvolvidos desde meados do século XVII, culminando nos séculos XIX e XX em alguns equipamentos renomados, como a **máquina de Wimshurst** e o **gerador de Van de Graaff**, respectivamente.



Esses geradores são capazes de produzir **voltagens altíssimas**, porém com **baixa corrente elétrica**, resultando em **baixa potência**. Sendo assim, a **utilização de geradores eletrostáticos ficou restrita a aplicações muito específicas**, e nunca se estabeleceram na produção de eletricidade em larga escala, que ficou a cargo dos geradores eletromagnéticos de corrente alternada, baseados no fenômeno da indução eletromagnética.

Em 2012, a ideia de utilizar a **eletrização por atrito para a produção de energia elétrica ressurgiu**, desta vez na forma de **nanogeradores triboelétricos**: dispositivos que convertem energia mecânica em eletricidade por meio do contato entre materiais distintos [2].

Desde então, esses dispositivos têm atraído muito interesse, dada a sua **potencial aplicação na alimentação de equipamentos portáteis de baixa potência**, como sensores autoalimentados, aliadas ao baixo custo e facilidade de fabricação.

Modos de funcionamento de nanogeradores triboelétricos

O mecanismo por trás do funcionamento dos **nanogeradores triboelétricos** são o **efeito triboelétrico e a indução elétrica**. De modo geral, a construção de **nanogeradores triboelétricos** requer a utilização de **dois materiais com propriedades triboelétricas distintas**, além de eletrodos e isolamento elétrico apropriado entre as diferentes camadas.

A combinação entre materiais pode tanto envolver um par de dielétricos, quanto dielétricos e metais. A operação do nanogerador, basicamente, consiste na repetição cíclica de contato e separação das duas camadas triboelétricas, causados por um estímulo mecânico externo.

Durante o contato, **carga será transferida entre os materiais**, que quando separados, estabelecem uma diferença de potencial elétrico que, por sua vez, **induz o movimento de cargas nos eletrodos**.

Até o momento, **quatro modos básicos de funcionamento** foram desenvolvidos:

contact separation
(contato-separação)

lateral sliding
(deslizamento lateral)

single electrode
(eletrodo único)

free-standing
(posição livre)

Os quatro modos são esquematicamente ilustrados na **figura 2**.

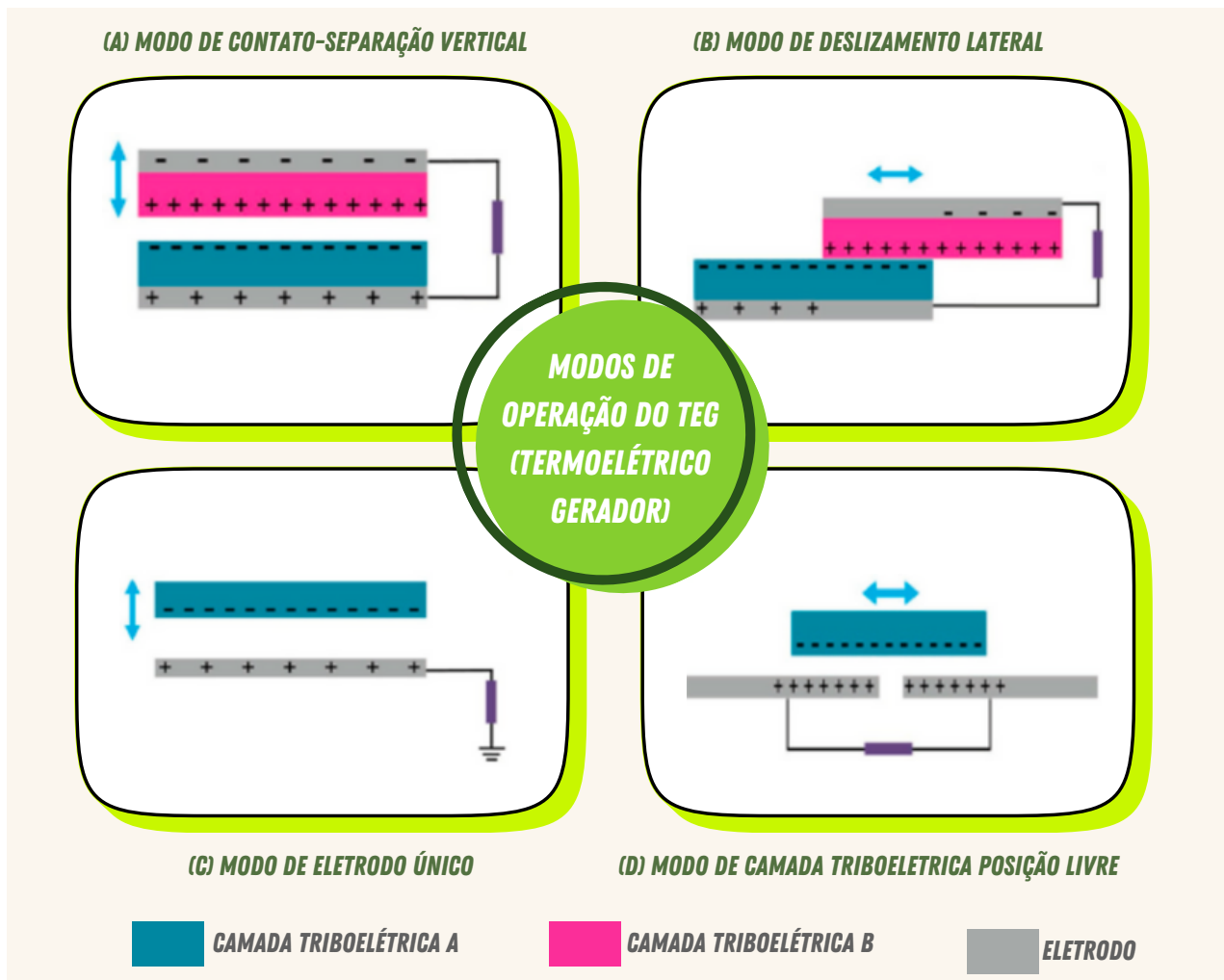


Figura 2 – Representação esquemático dos quatro modos básicos de operação de nanogeradores triboelétricos.

No **modo contato-separação**, Figura 2(a), a triboeletrificação ocorre pelo contato e separação de duas camadas triboelétricas. O processo pode ocorrer entre duas camadas dielétricas ou entre uma camada dielétrica e um metal.

O pressionamento das camadas uma contra a outra provoca a transferência de cargas entre elas, resultando em densidades de cargas de sinais opostos nas superfícies de cada camada.

O **potencial elétrico** produzido por essas cargas induzirá cargas nos eletrodos que, quando conectados como na Figura 2(a), resultará em uma **corrente elétrica fluindo do eletrodo inferior para o superior**.

Conforme o **nanogerador é liberado** e as **camadas se separam**, a diferença de potencial entre os eletrodos aumenta, mantendo o **fluxo da corrente elétrica**.

Se o **nanogerador** for pressionado novamente, a **aproximação das camadas reduz a diferença de potencial entre os eletrodos**, provocando um **fluxo de corrente elétrica no sentido contrário**, até que as camadas triboelétricas entrem em contato e as cargas em excesso se **neutralizem**.

Desta forma, o **ciclo de contato e separação** das camadas triboelétricas faz com que o gerador produza **pulsos de corrente alternada** [3]. Este modo foi o primeiro a ser desenvolvida, tendo sua utilização na alimentação de equipamentos eletrônicos de baixa potência demonstrada [2].

Este modelo tem a vantagem de ser simples, fácil de fabricar e de baixo custo. Além disso, múltiplas unidades podem ser combinadas para aumentar a potência produzida pelo dispositivo.

No **modo de deslizamento lateral**, Figura 2(b), o contato entre as **camadas triboelétricas** se dá por um movimento relativo paralelo ao plano. A construção e os mecanismos de produção de cargas e correntes elétricas são similares aos do modo de contato-separação.

Enquanto as **camadas triboelétricas** estiverem perfeitamente alinhadas, cargas positivas e negativas se compensarão e o sistema estará em equilíbrio. Com o desalinhamento entre as camadas, as cargas não poderão ser equilibradas totalmente, o que resulta em uma **diferença de potencial entre os eletrodos**, provocando o estabelecimento de uma **corrente elétrica** entre eles.



A maximização do contato entre as **camadas triboelétricas** favorece o processo de transferência de cargas, sendo assim, neste modo o **nanogerador é capaz de produzir densidades de cargas mais elevadas do que no modo contato-separação**. A grande desvantagem deste modelo está no fato de que o atrito entre as camadas produz desgaste dos materiais, reduzindo a vida útil do dispositivo.

A corrente entre os eletrodos pode ser mantida por um movimento periódico das camadas. Isso significa que este modo é capaz de **gerar eletricidade a partir do movimento de rotação de uma superfície**, o que não pode ser feito com outros nanogeradores convencionais [1].

A figura 2(c) mostra esquematicamente a **construção de um nanogerador de eletrodo único**. A carga elétrica é gerada pelo contato entre o dielétrico e o eletrodo.

O desempenho deste modo é negativamente afetado pela **baixa eficiência na transferência de carga**. Porém, a falta de necessidade de um fio conectando eletrodos, como nos modos anteriores, o torna **mais adaptável a diversos regimes de movimento**, o que fez com que esse modelo fosse aplicado na geração de energia a partir do movimento do ar e de pneus.



Além disso, também encontra aplicações como um **sensor auto-alimentado de toque e movimento** [3].

No **modo free-standing**, Figura 2(d), uma camada dielétrica se move livremente acima de uma série de dois ou mais eletrodos espaçados.

A **camada dielétrica móvel** pode ser previamente carregada, evitando, assim, a necessidade de se empregar camadas adicionais para a produção de cargas. Conforme o dielétrico se move, as cargas nele existente induzirão uma densidade de cargas de **sinal oposto nos eletrodos**.

Quando dielétrico e eletrodo estão perfeitamente alinhados, o sistema estará em equilíbrio. Mas, ao seguir seu movimento, se **posicionando parcialmente acima do próximo eletrodo**, as cargas induzidas no segundo eletrodo causarão um **desequilíbrio no sistema**. Desta forma, surgirá uma diferença de potencial entre os eletrodos, estabelecendo uma corrente elétrica entre eles.

Como não há contato direto entre a **camada dielétrica** e os eletrodos, o desgaste dos materiais é mínimo. Sendo assim, este modo de operação combina **alto desempenho com uma longa vida útil**.

A desvantagem está no fato da **construção deste modelo de nanogerador ser mais complexa**, o que limita suas possibilidades de aplicação quando comparado aos modelos anteriores.

Modelos teóricos

Considerando a natureza complexa dos fenômenos envolvidos na **triboeletricidade** e as possibilidades de **diferentes construções de geradores triboelétricos**, a tarefa de estabelecer um modelo ou parâmetro capaz de prever o desempenho de **nanogeradores triboelétricos**, assim como oferecer caminhos para a otimização de seu funcionamento, se torna difícil.

Ainda assim, modelos teóricos têm sido propostos. Os modelos existentes podem ser **divididos em duas categorias**:

- ▶ (i) modelos relativos a dispositivos;
- ▶ (ii) modelos relativos a materiais.

Em todos os modelos da **primeira classe**, assume-se que densidades de cargas de mesma magnitude e sinais opostos se formam nas **superfícies triboelétricas em contato**. Além disso, as densidades de carga não variam após serem estabelecidas.

Em outras palavras, admite-se que os materiais são isolantes perfeitos.

Já nos modelos relativos a materiais, admite-se que as cargas geradas nas **camadas triboelétricas possam se mover ou serem anuladas**. Ou seja, a densidade de cargas não permanecerá necessariamente constante no tempo [1].

Ambos os tipos de modelos oferecem **informações valiosas para o entendimento e melhoramento dos nanogeradores triboelétricos**.

Em um exemplo de modelo relativo a dispositivo, pesquisadores utilizaram uma abordagem baseada em **elementos de circuitos planares**, obtendo a seguinte expressão para a figura de mérito de nanogeradores no modo contato-separação [1]:

$$F = \frac{2 \varepsilon_0}{\sigma^2} \frac{E_M}{A \cdot \chi_{max}} \quad (1)$$

Na equação (1), ϵ_0 é a permissividade dielétrica do vácuo, σ é a densidade de carga produzida nas camadas triboelétricas, E_m é a máxima energia produzida por ciclo, A é a área superficial do eletrodo e X_{max} é a separação máxima entre as camadas triboelétricas.

De um ponto de vista prático, uma outra figura de mérito para a densidade de potência máxima foi proposta por Peng e colaboradores [4]. Eles apontaram que, no **modo contato-separação, o movimento periódico das camadas dielétricas produz no sistema uma capacitância variável no tempo.**

Para que o nanogerador atinja a maior potência possível, a frequência angular (ω) do movimento das camadas triboelétricas deve ser igual à frequência do circuito equivalente ao dispositivo ($1/RC$). A figura de mérito resultante desta abordagem é descrita pela equação:

$$F = 0,064 \frac{\sigma^2 \cdot \bar{v}}{\epsilon_0} \quad (2)$$

Na qual $v = \omega \cdot X_{max} / \pi$ é a velocidade média do movimento.

De acordo com os modelos apresentados acima, a **densidade de carga triboelétrica**, ou seja, a carga transferida entre as superfícies, é o **único parâmetro relacionado aos materiais que impacta o desempenho dos nanogeradores.**

Isso significa que a transferência de cargas é o único processo crítico que precisa ser considerado no desenvolvimento de dispositivos eficientes.

No entanto, deve-se notar que os modelos relativos a dispositivos consideram que a **carga elétrica se concentra apenas na superfície dos dielétricos** e não podem se mover ou se dissipar. **Por esse motivo, tais modelos também são chamados de “modelos de cargas estáticas”**.

Para elucidar quais são os resultados do movimento de cargas através do dielétrico, Cui e colaboradores introduziram um “**modelo dinâmico de cargas**” [5]. Dado que o movimento de cargas é determinado por propriedades do material, esse modelo é classificado como **relativo ao material**.

O **modelo dinâmico de cargas** considera que as cargas triboelétricas podem se **mover e ser armazenadas** (ou se perderem) através do material dielétrico por dois mecanismos: **difusão provocada pelo campo elétrico** e **recombinação com as cargas no eletrodo**, respectivamente.

Por simplicidade, o modelo despreza fenômenos como a difusão causada por um gradiente de concentração, a influência de defeitos no material, e a absorção de cargas pela atmosfera.

Além disso, considera-se um campo elétrico elevado e que a área superficial do dielétrico seja muito maior do que sua espessura. Como resultado, as **cargas triboelétricas** estarão distribuídas por todo o volume do material. Além disso, a **densidade de carga varia com a espessura do material** devido ao processo de recombinação que ocorre na interface com o eletrodo.



O principal resultado do modelo dinâmico de carga é que a espessura do dielétrico influencia diretamente a carga total presente nas camadas após o contato.

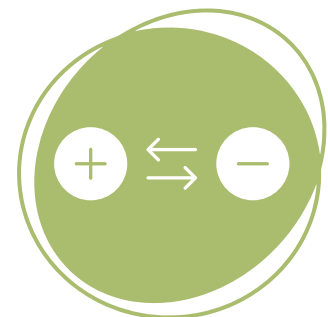
Isso se dá porque em **dielétricos finos**, as cargas podem facilmente **alcançar a interface com o eletrodo**, onde serão anuladas. Sendo assim, uma **camada dielétrica espessa tem a capacidade de reter uma maior quantidade de carga do que uma camada fina**, afetando a corrente elétrica fornecida pelo nanogerador.

Portanto, existe uma espessura ótima que maximiza a eficiência do dispositivo.

O **modelo dinâmico de cargas** também indica que métodos de processamento que permitem a modificação das propriedades de materiais podem ser empregados para melhorar o **desempenho dos nanogeradores triboelétricos**.

Materiais

A **natureza da triboeletrificação é a transferência de cargas entre dois materiais em contato**. A direção da transferência dependerá da diferença de afinidade eletrônica dos dois materiais.



Aquele com a **maior afinidade eletrônica irá atrair elétrons**, tornando-se um **receptor de elétrons**, enquanto o outro material **perderá elétrons**, portanto atuando como um **doador de elétrons**.

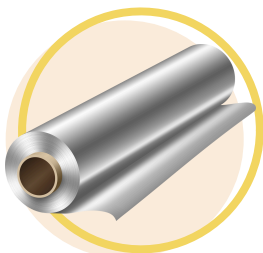
Geralmente, doador e receptor podem ser identificados a partir de suas posições na série triboelétrica.



Recentemente, diversos pesquisadores têm se dedicado ao desenvolvimento de técnicas e estabelecimento de padrões que permitam a **quantificação da carga produzida na superfície de diferentes materiais sujeitos à triboeletrificação**, possibilitando assim, a organização de uma **série triboelétrica confiável** para a seleção de **materiais aplicáveis em nanogeradores** [6,7,8].

Entre os receptores de elétrons mais utilizados em **nanogeradores triboelétricos** encontram-se diversos polímeros, como **politetrafluoretileno** (PTFE), **dimetil polissiloxano** (PDMS), **etileno propileno fluorado** (FEP) e **Kapton** [9].

Outros matérias também citados na literatura são fluoreto de **polivinilideno** (PVDF), **poliolefinas**, **poliestireno** (PS), **poliéster**, **silicone**, **celulose**, **acrílico**, **borracha** e **materiais bidimensionais como o grafeno** [9].



Já como doadores de elétrons, muitos trabalhos reportam a utilização de metais como alumínio, cobre, prata, ouro e aço, além de polímeros como náilon, PET, polimetilmetacrilato (PMMA), **poliuretano (PU)**, **Kapton e acetato de vinila (PVA)**. Outros materiais incluem **celulose**, **óxido de índio e estanho (ITO)**, **látex**, **seda**, **grafeno** e **nanotubos de carbono** [9].

Aplicações

Potenciais aplicações de **nanogeradores triboelétricos** se estendem a diversas áreas, sendo classificadas em quatro categorias principais: **micro/nanoenergia; sensores auto-alimentados; energia azul e fontes de alta tensão.**

Graças a características como leveza, baixo custo, grande disponibilidade de materiais e modos de operação, os **nanogeradores triboelétricos** encontram vasta aplicação como **fontes de micropotência alimentada pela energia disponível no ambiente e biomecânica**, como no movimento do corpo humano, batimentos cardíacos, vibrações mecânicas e no vento.

Se tratando da conversão de energia a partir de vibrações mecânicas de baixa frequência, **nanogeradores triboelétricos possuem desempenho superior a outras alternativas, como nanogeradores piezelétricos.**

Sendo assim, desde o princípio de seu desenvolvimento, **nanogeradores triboelétricos** vêm sendo aplicados na produção de eletricidade a partir da energia biomecânica. Sua integração a mochilas, calçados e roupas já foi demonstrada em diversos estudos.



A energia capturada a partir da movimentação do usuário foi utilizada para alimentar **relógios, monitores de atividade física e sensores de temperatura**, para citar alguns exemplos [10].

Em outra abordagem, pesquisadores utilizaram **materiais biocompatíveis para desenvolver nanogeradores biodegradáveis.**

Tais dispositivos poderiam ser implantados no corpo humano, retirando energia de **batimentos cardíacos, movimento respiratório** e da **pressão sanguínea** para alimentar equipamentos terapêuticos ou de diagnóstico temporários [10].

Após um determinado período que pode variar entre dias e semanas, a depender dos materiais utilizados, esses dispositivos seriam **degradados e expelidos naturalmente pelo corpo**.

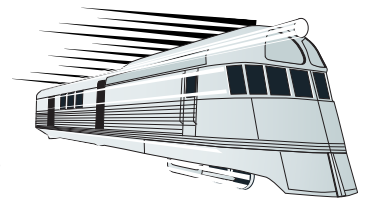
Para além da energia do movimento do corpo humano, os **nanogeradores triboelétricos** também foram utilizados na **captura de energia a partir do movimento de fluidos no ambiente**, como o vento e gotas de chuva [11,12].



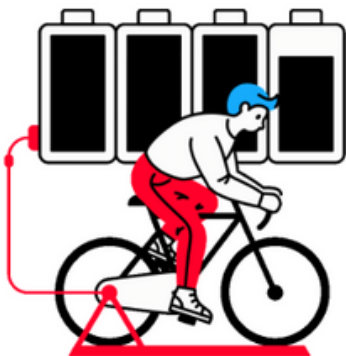
Em um estudo, pesquisadores desenvolveram **nanogeradores** que coletam energia a partir do **movimento de galhos de árvores**, causados pelo vento, para alimentar sensores *wireless* que fazem parte de um sistema de detecção de incêndios em florestas [12].



Em um outro exemplo, **nanogeradores no modo deslizamento lateral** foram utilizados para gerar energia a partir das **correntes de ar causadas pelo movimento de trens de alta velocidade**. Esses geradores poderiam servir para alimentar sensores presentes no veículo [13].




Nanogeradores triboelétricos também podem aproveitar a energia das vibrações produzidas pelo funcionamento de máquinas e veículos. Em um estudo, pesquisadores acoplaram **nanogeradores a uma bicicleta**, a energia capturada a partir das vibrações foi suficiente para **carregar um capacitor de 1 mF**, elevando a tensão de 1 para 2,3 V [12]. Outra possível fonte de energia são as ondas acústicas [12].



Uma vez que **nanogeradores triboelétricos** são capazes de **converter estímulos mecânicos** diretamente em sinais elétricos sem necessidade de transdutores adicionais, existe grande potencial para sua **aplicação no campo de sensores ativos e auto-alimentados**, que consomem menos energia e requerem circuitos mais simples do que sensores passivos tradicionais. Trabalhos pioneiros relevantes incluem **sensores táteis, sensores acústicos, sensores de aceleração e movimento, sensores químicos e de gases** [10,13,14].

Uma aplicação particularmente interessante de **sensores triboelétricos** têm sido no desenvolvimento de **interfaces homem-máquina inovadoras**. Exemplos incluem painéis capazes de **identificar o usuário pelo padrão de digitação**, equipamentos que **captam micromovimentos oculares** e os **transformam em comandos e interfaces** que transformam sons em sinais elétricos [10].

Já aplicações relacionadas à saúde humana incluem sensores de suor, monitores de respiração e aparelhos auditivos [10,13,14].



Energia azul é o nome dado à eletricidade produzida a partir do **movimento de ondas nos oceanos**. De acordo com estimativas, a energia disponível globalmente no movimento das ondas é cerca de **29.500 TWh por ano** [15], o que é aproximadamente equivalente à **energia elétrica produzida mundialmente em um ano**.

Atualmente, a grande maioria dos **geradores de energia azul** são **geradores eletromagnéticos**. No entanto, **nanogeradores triboelétricos** têm sido explorados nesse contexto, uma vez que são mais eficientes para produzir eletricidade a partir de movimentos de baixa frequência.

Os **geradores de energia azul triboelétricos** podem ser divididos em **duas categorias**:

- equipamentos encapsulados baseados no contato entre sólidos;
- equipamentos baseados no contato entre líquido e sólido.

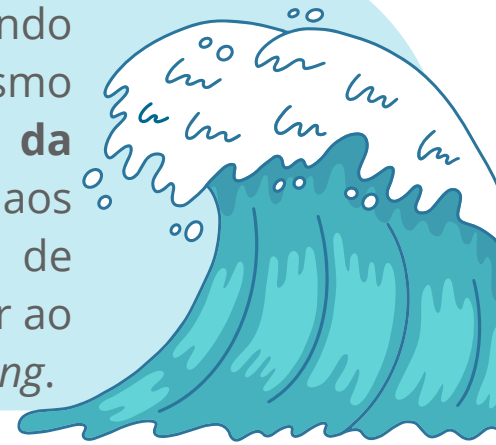
Os **geradores encapsulados** minimizam os impactos adversos da umidade e condições do ambiente, porém sua fabricação e manutenção são mais complexas.

Já os **geradores baseados no contato líquido-sólido** são, em geral, fabricados na forma de filmes finos acoplados a estruturas apropriadas. O desempenho dessa classe de dispositivos é limitado pela eletrificação causada pelo contato entre o material e a água e pelas condições ambientais [11,14].

Dentre os diversos projetos de **geradores triboelétricos** propostos para a **produção de energia azul**, os mais promissores tendem a utilizar o **movimento de uma esfera no interior de uma cápsula oca**.

Em um estudo, pesquisadores utilizaram uma **esfera de náilon** posicionada no **interior de uma casca esférica**, em cujo interior uma **camada de Kapton** foi depositada e, abaixo dela, dois **eletrodos metálicos** foram posicionados em hemisférios opostos.

O **movimento das ondas** faz com que a esfera role por cima da camada de Kapton, provocando o processo de **triboeletrificação**. O mesmo movimento, provoca ainda a **alteração da posição da esfera** carregada em relação aos eletrodos, estabelecendo uma diferença de potencial elétrico entre eles, de maneira similar ao que acontece no modo de operação *free-standing*.



Utilizando o dispositivo em um tanque com ondas de frequência de 1,43 Hz, os pesquisadores mediram uma **tensão de circuito aberto de até 12 kV** [16].

Nanogeradores triboelétricos possuem como característica intrínseca altas voltagens e baixas correntes, o que os tornam alternativas interessantes a geradores de alta tensão convencionais com portabilidade e segurança sem precedentes. Alcançando facilmente tensões entre 1 e 10 kV, **nanogeradores triboelétricos dispensam a utilização de circuitos sofisticados, reduzindo complexidade e custos.**

Dada a limitada transferência de cargas por ciclo de operação, idealmente, **nanogeradores triboelétricos devem ser utilizados em aplicações que não dependam de altas correntes.** Além disso, as baixas correntes podem ser vantajosas por representarem um menor risco a pessoas e equipamentos.

A utilização de **nanogeradores triboelétricos** como fontes de alta tensão tem sido considerada majoritariamente em equipamentos científicos, como **espectrômetros de massa, equipamentos de eletrofiação, emissão de elétrons por campo e geração de microplasma** [10].

Porém aplicações mais corriqueiras também estão sendo consideradas, como a utilização em **purificadores de ar e filtros de exaustão veicular**, nos quais a alta tensão é utilizada para atrair e remover partículas presentes no ar [10].

Estratégias para melhoramento do desempenho

Apesar da ampla perspectiva de aplicação dos **nanogeradores triboelétricos**, seu desempenho ainda precisa ser aprimorado.

Frequentemente, os **nanogeradores** tendem a ser aplicados em contextos nos quais a energia mecânica disponível tende a ser irregular e instável, desta forma a amplitude e frequência da **corrente elétrica produzida tendem a ser aleatórias**, inapropriada para alimentar diretamente dispositivos eletrônicos tradicionais, que requerem um sinal de entrada contínuo e estável.

Soluções iniciais focaram na integração entre nanogeradores e dispositivos de armazenamento de energia, como **baterias e supercapacitores, via retificadores** [10].

Porém, os **nanogeradores** são intrinsecamente dispositivos que operam em **alta voltagem e baixa corrente**, com impedância da ordem de megaohm. **Tais características tornam muito baixa a eficiência da conversão de energia entre os nanogeradores e os dispositivos de armazenamento, em particular devido à grande diferença de impedância entre esses equipamentos.**

O uso de transformadores tradicionais para baixar a tensão e elevar a corrente resultam em altas perdas devido à alta impedância e natureza pulsada da corrente produzida.

Além disso, a energia fornecida por **geradores triboelétricos** por ciclo de operação raramente é maximizada, uma vez que **nem toda a carga triboelétrica produzida é transferida entre eletrodos.**

Métodos tradicionais de gerenciamento de energia são inadequados para lidar com esse fenômeno irregular. Assim, o **desenvolvimento de novos circuitos de gerenciamento de energia se faz necessário.**

Progressos recentes podem ser divididos em duas estratégias:

- desenvolvimento de conversores de potência para o ajuste de impedâncias;
- e o desenvolvimento de sistemas que maximizem a transferência de energia [10].

As duas estratégias podem ainda ser **aplicadas conjuntamente**, melhorando o desempenho final do dispositivo.

Apesar de ser uma estratégia de baixo custo, a **implementação de circuitos de gerenciamento de energia aumenta a complexidade do sistema**, limitando os contextos nos quais os nanogeradores podem ser aplicados.

Uma vez que a potência fornecida por **nanogeradores triboelétricos** é diretamente dependente da densidade de cargas produzida no processo de **triboeletrificação**, a maximização da carga produzida pelo contato entre as camadas triboelétricas tem sido o principal foco da pesquisa em **materiais para construção de nanogeradores.**

A maneira mais óbvia de se aumentar a densidade de cargas é por meio do **aumento da área de contato efetiva entre os materiais.**

A área de contato efetiva entre duas superfícies geralmente estará distante dos 100% devido à rugosidade, por exemplo.

Um método para aumentar a área de contato é a criação de micro e nanoestruturas nas superfícies, como nanofios, nanotubos, pirâmide, cubos e hemisférios.

Diversos estudos demonstraram que a **nanoestruturação das superfícies resulta em um aumento na potência do dispositivo** [1,10]. No entanto, o contato contínuo entre as superfícies tende a **danificar tais estruturas**, afetando negativamente a confiabilidade e diminuindo a vida útil dos geradores.



Uma alternativa que tem sido explorada, é a substituição da interface entre sólidos, por uma interface sólido-líquido [10,11].

Embora simples e efetivas, o efeito do aumento da área superficial sobre o desempenho dos **nanogeradores triboelétricos** é limitado. Para um impacto maior, é necessário que se **alterem as propriedades do material** diretamente ligadas aos processos de produção e transferência de cargas.

Uma maneira de aumentar a densidade de cargas é injetar elétrons ou íons diretamente nas camadas triboelétricas do gerador, o que pode ser feito por meio de um canhão de elétrons/íons ou por descarga de corona [1,13].

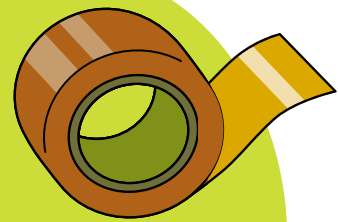


Desta forma é possível gerar uma **densidade de cargas de maneira controlada**, possibilitando que se atinja o carregamento máximo do material, que será determinado pela rigidez dielétrica do ar.

Existem, no entanto, algumas questões críticas relacionadas a esse método. Primeiramente, a injeção de cargas requer um **material triboelétrico relativamente espesso**, caso contrário as cargas tendem a ser rapidamente anuladas, conforme proposto no modelo dinâmico de cargas.

Outro fator, é que a carga produzida no material tende a se atenuar com o passar do tempo pela **interação com a umidade e partículas carregadas** presentes na atmosfera.

Em um estudo, uma lâmina de FEP que sofreu injeção iônica **perdeu cerca de 83% da carga total** após 20 dias, enquanto uma lâmina de Kapton sofreu uma **redução de 80% da carga** em 5 dias [1].



Isso significa que essa técnica não é adequada para algumas aplicações de sensoriamento, por exemplo, nas quais o **material triboelétrico sofreria um estímulo por alguns segundos e passaria longos períodos em espera**.

A **densidade de cargas triboelétricas** também pode ser manipulada por meio da modificação química das superfícies, um processo denominado funcionalização.

A funcionalização consiste na ligação de grupos funcionais como, -F, -Cl e -NH₂ à superfície, desta forma alterando a afinidade eletrônica do material e **favorecendo a transferência de cargas**. Como outras técnicas de modificação de superfícies, a principal desvantagem da funcionalização está na sua sensibilidade ao atrito.

Como uma alternativa mais robusta, pesquisadores têm considerado a **utilização de materiais ferroelétricos**, isto é, matérias que possuem uma polarização elétrica estável.

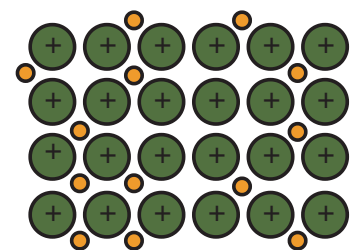
De fato, resultados mostram que a **polarização elétrica do material afeta a densidade de cargas e o desempenho de nanogeradores** [1,17]. Dado que a **ferroeletricidade** está relacionada ao alinhamento de dipolos elétricos no interior do material, e não em sua superfície, a utilização de materiais ferroelétricos como triboelétricos pode resultar em **nanogeradores mais resistentes**.

Durante a operação do nanogerador, a **carga triboelétrica** é utilizada para induzir o movimento de cargas livres a partir dos **eletrodos passando por um circuito externo**. Porém, como dito anteriormente, a **carga triboelétrica tende a se dissipar**, sendo tal processo determinado pelas propriedades do material dielétrico.

A capacidade de manter as cargas triboelétricas tem sido chamada, de maneira geral, de armazenagem de cargas.

O melhoramento da **armazenagem de carga em materiais dielétricos** constitui um importante objetivo de pesquisas na busca do aprimoramento do desempenho dos nanogeradores triboelétricos.

Uma propriedade relacionada à retenção de cargas é a **constante dielétrica do material**. Segundo resultados publicados, o aumento da constante dielétrica pode levar a densidades de carga mais elevadas.



Uma maneira de aumentar a constante dielétrica das camadas triboelétricas é **incorporar nanopartículas de materiais com alta constante dielétrica**, como BaTiO₃, a elas [1].

Outra maneira de melhorar a armazenagem de carga é por meio da introdução de “**armadilhas de carga**”, isto é, estados eletrônicos nos quais a mobilidade dos portadores de carga é muito baixa impedindo sua difusão pelo material.

Armadilhas em geral estão ligadas a defeitos físicos, como imperfeições na estrutura cristalina, e químico, como ligações pendentes (*dangling bonds*).

Uma estratégia baseada nesse conceito é a **utilização de multicamadas** [1]. Assim, a camada superior seria feita de um material com **alta capacidade de geração de cargas triboelétricas**. Abaixo dela viriam uma ou mais **camadas de armazenagem**, feitas de materiais distintos com alta densidade de armadilhas.

Outra abordagem experimentada é a **dispersão de nanopartículas de materiais inorgânicos em matrizes de polímeros** [1].

Conclusão

Como uma relativamente nova forma de produção de energia, **dispositivos triboelétricos** têm atraído atenção significativa devido a características como **desempenho, eficiência, baixo custo e facilidade de fabricação**.

As diversas possibilidade de materiais, em particular, é uma vantagem expressiva desta tecnologia em relação a outros métodos de **geração de eletricidade**. Assim, um grande número de combinações entre materiais foi sugerido e investigado para as mais diversas aplicações.

Entretanto, os **nanogeradores triboelétricos** ainda **enfrentam sérios desafios para se tornarem uma tecnologia madura e amplamente utilizada.**

Conforme o que foi discutido neste texto, os principais pontos que ainda carecem de maior entendimento científico e desenvolvimento tecnológico serão sumarizados a seguir:

- Embora seja um fenômeno conhecido há milênios, os mecanismos fundamentais da eletrização por contato ainda não são completamente entendidos. Embora algumas hipóteses tenham sido propostas, uma **teoria conclusiva ainda se faz necessária.**

- **Novos materiais tribo-positivos** precisam ser desenvolvidos. Embora se espere que dispositivos triboelétricos baseados em materiais localizados nos extremos da série triboelétrica apresentem **capacidade superior de captação de energia**, a maior parta da pesquisa realizada até o momento tem focado em materiais tribo-negativos como PTFE, PVDF e PDMS.

Além disso, a vasta maioria dos materiais do lado positivo da série são **materiais biológicos ou naturais**, como pele humana e algodão, e possuem baixa resistência mecânica. Assim, o **desenvolvimento de materiais tribo-positivos robustos é crucial** não apenas para melhorar o desempenho de dispositivos triboelétricos como também para estender o leque de aplicações.

- Embora a funcionalização de superfícies seja um método eficaz para maximizar a **transferência de cargas** entre as **camadas triboelétricas**, ele não pode ser aplicado para fins práticos devido à **baixa durabilidade da camada funcionalizada**. Sendo assim, métodos avançados de funcionalização e/ou camadas funcionalizadas resistentes devem ser desenvolvidos.

- O **desenvolvimento de polímeros com alta polarização elétrica espontânea** seria uma boa abordagem para a melhoria do desempenho de **dispositivos triboelétricos**. Com respeito à durabilidade, controlar a polarização espontânea é o método mais viável de **aumento de densidade de cargas**, uma vez que está relacionado ao ordenamento interno da estrutura do material dielétrico.

Se for possível **aumentar a intensidade da polarização de polímeros ferroelétricos convencionais** isso se traduziria em uma grande melhoria na potência fornecida por **nanogeradores triboelétricos**. No entanto, o processo adicional de polarização com altos campos elétricos precisaria ser abordado.

- As abordagens de **melhoramento do desempenho** a partir do **aumento da constante dielétrica** e da **criação de armadilhas** podem ser aprofundadas pelo desenvolvimento de **nanocompósitos** baseados em **polímeros**, que têm grande potencial para se tornarem a nova geração de **materiais para dispositivos triboelétricos**. Muitos nanogeradores triboelétricos baseados em nanocompósitos já foram propostos, ainda assim, muitas combinações de materiais podem ser exploradas.

- **Estruturas multicamadas** formadas pela combinação de diversos materiais podem ser investigadas visando a produção de **dispositivos de alto desempenho**. No entanto, o papel de camadas adicionais, incluindo camadas de armazenagem de cargas, camadas de transferência de cargas e camadas de bloqueio de cargas, ainda precisa ser estudado mais detalhadamente.
- Fatores externos como **umidade e pH** tendem a **alterar as propriedades dos materiais**, o que por sua vez resulta na **queda do desempenho de dispositivos triboelétricos**. Assim, materiais resistentes a fatores ambientalmente e químicos precisam ser desenvolvidos.

Desde 2012, o **desempenho de nanogeradores triboelétricos tem avançado significativamente**. Hoje, é grande a perspectiva de que, com o desenvolvimento de novos materiais, dispositivos triboelétricos altamente eficientes possam ser desenvolvidos, tornando realidade **fontes de energia sustentáveis** para aplicações como internet das coisas, dispositivos *wireless* e eletrônicos portáteis/vestíveis.

Além disso, essa tecnologia nos possibilitaria desenvolver **sensores auto-alimentados de pressão, movimento, trajetória, vibração, acústico, para aplicações químicas e biomédicas**. Por fim, o desenvolvimento de novos materiais elevará a **viabilidade de geradores triboelétricos** para a produção de eletricidade em larga escala a partir de fontes renováveis como a **energia azul e eólica**.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. S. Choi, S.-W. Kim, S. Kar-Narayan, **Materials-Related Strategies for Highly Efficient Triboelectric Energy Generators**. Adv. Energy Mater. 2021, 11, 2003802. <https://doi.org/10.1002/aenm.202003802>
- [2] Feng-Ru Fan, Zhong-Qun Tian, Zhong Lin Wang, **Nano Energy 1**, 2012, Pages 328-334, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.01.004>
- [3] Z. L. Wang, ACS Nano 7, 20113, pp 9533-9557, 10.1021/nn404614z
- [4] Jun Peng et al., **Optimization principles and the figure of merit for triboelectric generators**. Sci. Adv. 3, eaap8576(2017). DOI:10.1126/sciadv.aap8576
- [5] Nuanyang Cui, Long Gu, Yimin Lei, Jinmei Liu, Yong Qin, Xiaohua Ma, Yue Hao, and Zhong Lin Wang, **ACS Nano 2016 10 (6)**, 6131-6138 DOI: 10.1021/acsnano.6b02076
- [6] Zou, H., Zhang, Y., Guo, L. et al. **Quantifying the triboelectric series**. Nat Commun 10, 1427 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09461-x>
- [7] Zou, H., Guo, L., Xue, H. et al. **Quantifying and understanding the triboelectric series of inorganic non-metallic materials**. Nat Commun 11, 2093 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15926-1>
- [8] G. Khandelwal, N. P. Maria Joseph Raj, S.-J. Kim 2101170, **Materials Beyond Conventional Triboelectric Series for Fabrication and Applications of Triboelectric Nanogenerators**. Adv. Energy Mater. 2021, 11, 2101170. <https://doi.org/10.1002/aenm.202101170>
- [9] Zhang R, Olin H. **Material choices for triboelectric nanogenerators: A critical review**. EcoMat. 2020;2:e12062. <https://doi.org/10.1002/eom2.12062>

REFERÊNCIAS

- [10] C. Wu, A. C. Wang, W. Ding, H. Guo, Z. L. Wang, **Adv. Energy Mater.** 2019, 9, 1802906. <https://doi.org/10.1002/aenm.201802906>
- [11] G. Cheng, T. Zhang, X. Fu, J. Hua, W. Dai, J. Cao, W. Sun, J. Ding, **A Comprehensive Review of Advancements and Challenges from Solid-Solid to Liquid-Solid Triboelectric Nanogenerators.** *Adv. Mater. Technol.* 2024, 9, 2301588. <https://doi.org/10.1002/admt.202301588>
- [12] Le, X.; Guo, X.; Lee, C. **Evolution of Micro-Nano Energy Harvesting Technology—Scavenging Energy from Diverse Sources towards Self-Sustained Micro/Nano Systems.** *Nanoenergy Adv.* 2023, 3, 101–125. <https://doi.org/10.3390/nanoenergyadv3020006>
- [13] Shi, Z.; Zhang, Y.; Gu, J.; Liu, B.; Fu, H.; Liang, H.; Ji, J. **Triboelectric Nanogenerators: State of the Art.** *Sensors* 2024, 24, 4298. <https://doi.org/10.3390/s24134298>
- [14] Zhu J, Zhu M, Shi Q, et al. **Progress in TENG technology—A journey from energy harvesting to nanoenergy and nanosystem.** *EcoMat.* 2020; 2:e12058. <https://doi.org/10.1002/eom2.12058>
- [15] Siya Jin, Deborah Greaves, **Wave energy in the UK: Status review and future perspectives, Renewable and Sustainable Energy Reviews,** Volume 143, 2021, 110932, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110932>
- [16] Wang X., Niu S., Yin Y., Yi F., You Z., Wang Z. L. (2015). **Triboelectric Nanogenerator Based on Fully Enclosed Rolling Spherical Structure for Harvesting Low-Frequency Water Wave Energy.** *Adv. Energy Mater.*, 5: 1501467. doi: 10.1002/aenm.201501467
- [17] Zhang, Z.; Wu, T.; Sun, E.; Chen, Y.; Wang, N. **Ferroelectric Material in Triboelectric Nanogenerator.** *Materials* 2024, 17, 2834. <https://doi.org/10.3390/ma17122834>



NAPI
Energia
Zero-Carbono

CAPITULO 5

FONTES DE ENERGIA ZERO CARBONO PARA GERAÇÃO EM LARGA ESCALA



4. Fontes de Energia Zero Carbono para geração em larga escala

a. Introdução

(Gustavo Sanguino Dias)

A crescente demanda por energia elétrica nas últimas décadas, em especial a partir da 3ª revolução industrial, impulsionou o desenvolvimento e a expansão de diversas **fontes energéticas** ao redor do mundo.

Paralelamente, as preocupações com as **mudanças climáticas** e a **sustentabilidade ambiental** têm promovido debates sobre a necessidade de transição para formas de energia menos dependentes de combustíveis fósseis.



Em resposta, **fontes de energia renovável**, como a **hidrelétrica, a eólica, a solar e a geotérmica**, têm sido destacadas como alternativas viáveis e sustentáveis para suprir as necessidades energéticas globais.

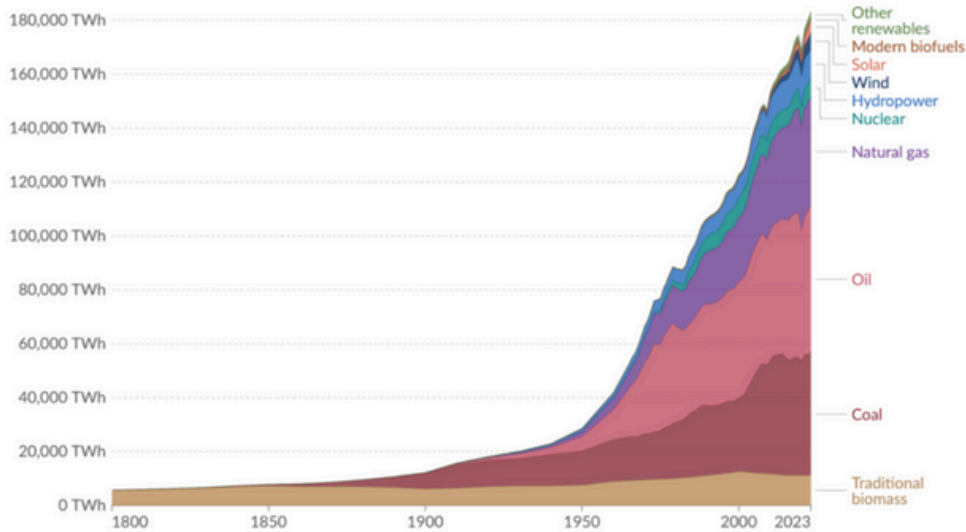
Além disso, a **energia nuclear**, considerada por muitos como uma fonte limpa em termos de emissão de gases de efeito estufa, também desempenha um papel significativo, apesar das controvérsias que a cercam.

Este capítulo discute essas **cinco principais fontes de energia**, analisando seus aspectos técnicos, impactos ambientais e importância estratégica na transição para um sistema energético mais sustentável.

Este capítulo discute essas **cinco principais fontes de energia**, analisando seus aspectos técnicos, impactos ambientais e importância estratégica na transição para um sistema energético mais sustentável.

Consumo global de energia primária por fonte

A energia primária é baseada no método de substituição e medida em terawatts-hora



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024); Smil (2017)

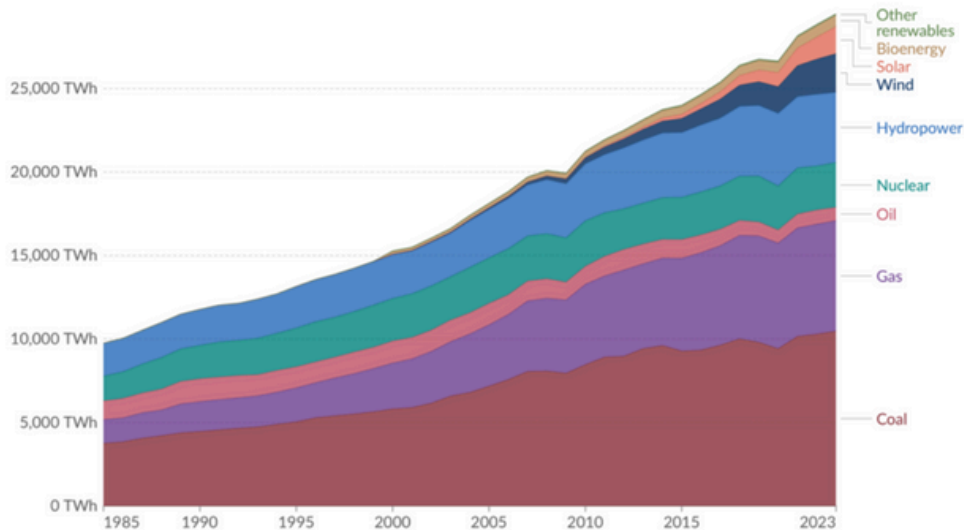
OurWorldinData.org/energy | CC BY

Note: In the absence of more recent data, traditional biomass is assumed constant since 2015.

Figura 01. Consumo global de energia primária por fonte. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>

Produção de eletricidade por fonte, Mundo

Medida em terawatts-hora



Data source: Ember (2024); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024)

OurWorldinData.org/energy | CC BY

Note: "Other renewables" include waste, geothermal, wave, and tidal.

Figura 02. Produção de eletricidade por fonte, Mundo. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>



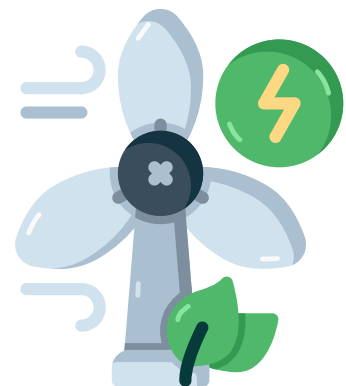
As **hidrelétricas**, uma das fontes de energia renovável mais antigas e difundidas, representam uma parte significativa da matriz energética global, responsáveis em 2023 por produzirem cerca de **14% da energia elétrica mundial**, particularmente em países com abundantes recursos hídricos.

A geração de eletricidade por meio do fluxo de água em grandes barragens é considerada uma solução de "**zero carbono**" porque não envolve a queima de combustíveis fósseis.

No entanto, é importante destacar que, embora a emissão direta de gases de efeito estufa seja praticamente inexistente durante a operação das usinas, o impacto ambiental das hidrelétricas não pode ser ignorado. Além disso, a eficácia dessas usinas depende das **condições climáticas e hidrológicas**, o que as torna vulneráveis a períodos de seca prolongados causados pelas mudanças climáticas.

Ainda assim, por sua alta **capacidade de geração em larga escala** e pela relativa estabilidade de fornecimento, as hidrelétricas continuam sendo uma peça-chave no cenário energético mundial.

A **energia eólica**, por outro lado, tem se destacado como uma das soluções mais promissoras e de rápido crescimento no contexto da transição para uma **matriz energética de baixo carbono**.



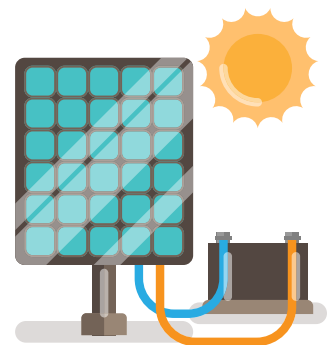
O avanço das **tecnologias de aerogeradores**, tanto em terra quanto *offshore*, permitiu uma ampliação significativa da capacidade instalada dessa fonte, representando em 2023 cerca de **7,8% da produção mundial de energia elétrica**.

A energia gerada pelo vento é uma fonte totalmente livre de emissões de carbono, o que a torna altamente atrativa dentro das políticas de mitigação das mudanças climáticas.

Contudo, a **natureza intermitente dos ventos representa um desafio para a geração contínua e confiável de energia em larga escala**. A variabilidade dos ventos, que podem ser sazonais ou até mesmo diários, exige soluções de **armazenamento energético**, como baterias ou a integração com outras fontes de energia complementares, como a hidroelétrica, para garantir a estabilidade do sistema elétrico.

Ainda assim, a **energia eólica**, com sua rápida curva de crescimento e potencial para expansão, é vista como uma das **principais forças impulsionadoras na transição para uma economia de baixo carbono**.

A **energia solar** também ocupa um papel central na discussão sobre **energias renováveis de zero carbono**. Os **painéis fotovoltaicos**, que convertem diretamente a luz solar em eletricidade, têm se tornado uma **alternativa viável e competitiva** em termos de custo, especialmente em regiões com alta incidência solar, como áreas desérticas e zonas tropicais.

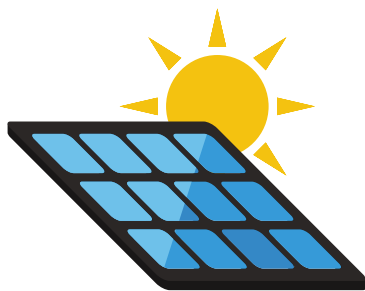


A principal vantagem da **energia solar** é sua abundância e onipresença, uma vez que o Sol é uma fonte praticamente infinita de energia. No entanto, a intermitência dessa tecnologia, similar à eólica, representa um grande desafio.

A produção de eletricidade solar está diretamente ligada à disponibilidade de luz, o que significa que ela não pode ser gerada à noite e é menos eficiente em dias nublados. **Isso exige a implementação de sistemas de armazenamento eficientes para garantir o fornecimento contínuo de energia.**

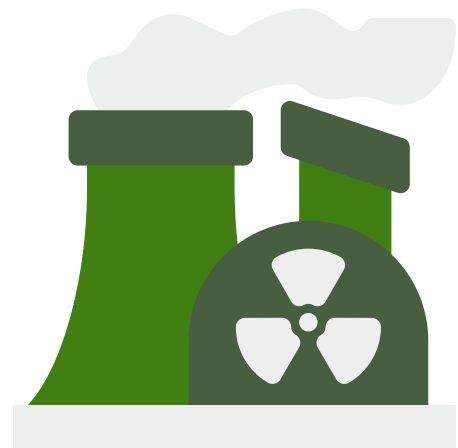
Além disso, o espaço físico necessário para grandes **parques solares** pode ser um fator limitante em áreas densamente povoadas ou com uso intensivo da terra para agricultura.

No entanto, com o avanço das tecnologias de baterias e sistemas de gerenciamento de energia, a **energia solar** continua a se posicionar como uma das principais opções para



uma geração de **energia de carbono zero** em larga escala, contribuindo de forma significativa com a produção mundial de energia elétrica, representando 5,5% em 2023.

A **energia nuclear** é outra fonte de grande potencial para a geração de **energia de zero carbono em larga escala**, embora envolva uma série de controvérsias e desafios. Esta representa atualmente 9,1% de toda a produção mundial de energia elétrica.



A **geração nuclear** é uma das formas mais concentradas de produção de eletricidade, capaz de fornecer grandes quantidades de energia de base de maneira **contínua e confiável**.

Diferente das **energias solar e eólica**, a nuclear não depende das condições climáticas e é capaz de operar 24 horas por dia, o que a torna uma das opções mais estáveis dentro das fontes de baixo carbono.

No entanto, as questões relativas à segurança, como o **risco de acidentes** e o problema dos **resíduos radioativos de longa duração**, continuam a levantar preocupações.

A **energia nuclear** não emite **gases de efeito estufa** durante a operação, mas a construção de novas usinas enfrenta barreiras econômicas, políticas e sociais, especialmente após desastres como o de Fukushima, no Japão.

Apesar disso, muitos especialistas consideram que a **energia nuclear** é essencial para a **transição energética**, dada sua capacidade de geração contínua e sua baixa emissão de carbono.

Por fim, a **energia geotérmica** oferece uma alternativa de **emissão zero** que, embora menos explorada em escala global, apresenta um grande potencial em regiões com condições geológicas favoráveis.



Essa forma de energia aproveita o calor interno da Terra, proveniente da atividade **geotérmica**, para gerar eletricidade de maneira estável e sem emissões de carbono.

Países como Islândia, Nova Zelândia e Filipinas são exemplos de nações que têm explorado esse recurso com sucesso, aproveitando suas localizações em áreas de **alta atividade geotérmica**.

No entanto, o **alto custo inicial de perfuração e exploração**, bem como os riscos de contaminação de águas subterrâneas, são **desafios** a serem superados para que essa tecnologia possa se expandir em maior escala global.

Assim, as fontes de energia discutidas neste capítulo – **hidrelétrica, eólica, solar, nuclear e geotérmica** – desempenham um papel crucial na busca por soluções energéticas de zero carbono para geração em larga escala.

Cada uma dessas fontes apresenta características únicas, **desafios técnicos e impactos ambientais distintos**, mas todas são **essenciais na luta contra as mudanças climáticas** e na **transição para um futuro energético mais limpo e sustentável**.

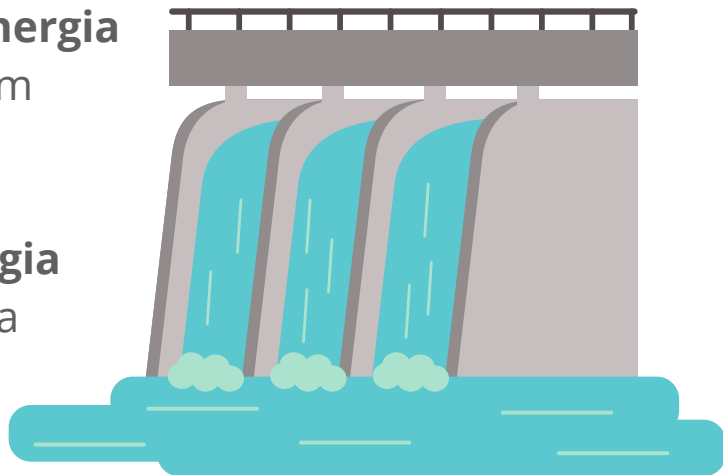
A integração dessas fontes dentro da **matriz energética global**, juntamente com o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento e redes inteligentes, será fundamental para **alcançar as metas climáticas** estabelecidas pelos acordos internacionais, como o **Acordo de Paris**.

a. Hidrelétrica

(Luiz Fernando Cótica)

As **usinas hidrelétricas** desempenham um papel crucial no setor de energia devido às suas **inúmeras vantagens**. Elas não apenas fornecem uma **fonte de energia confiável**, mas também contribuem significativamente para o **desenvolvimento sustentável**.

Isso ocorre porque oferecem **energia renovável e limpa**, que não esgota recursos e não polui o meio ambiente [1].



O objetivo é apresentar uma visão abrangente sobre a **energia hidrelétrica**. Inicialmente, será discutida sua importância no **cenário energético global**, destacando como ela se posiciona em relação a outras **fontes de energia renovável**. Em seguida, será explicado o funcionamento das **usinas hidrelétricas**, desde a captação da água até a geração de eletricidade.

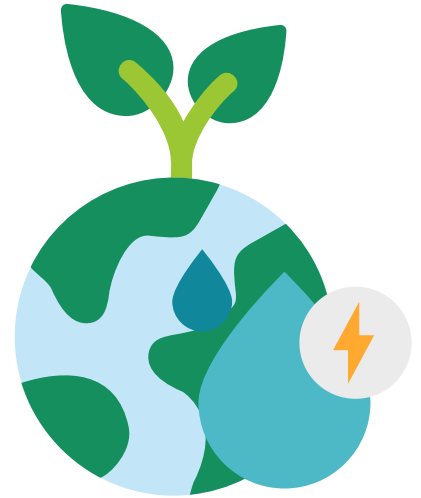
Além disso, serão explorados os **diferentes tipos de usinas hidrelétricas**, como as de armazenamento por reservatório e as de fio d'água, detalhando suas características e aplicações.

Finalmente, serão analisados os **impactos ambientais e sociais das usinas hidrelétricas**, com um foco especial no contexto brasileiro, onde este tipo de energia desempenha um papel vital na **matriz energética do país**. Serão considerados tanto os **benefícios** quanto os **desafios associados à expansão da energia hidrelétrica no Brasil**.

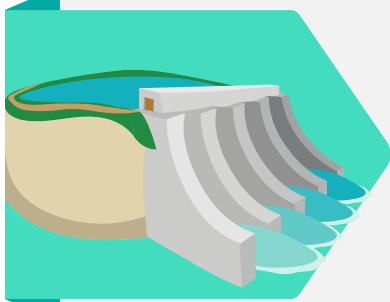


Importância das Usinas Hidrelétricas

A **energia hidrelétrica** é fundamental para reduzir a dependência externa de energia, promovendo a **segurança energética** do país e diminuindo a necessidade de **importação de combustíveis fósseis**. Este tipo de geração de energia também contribui para a **sustentabilidade ambiental**, pois é um processo limpo e renovável que ajuda a reduzir as emissões de gases de efeito estufa [1].



Avanços tecnológicos significativos permitiram uma **maior eficiência na operação das usinas, otimizando o uso dos recursos hídricos disponíveis**. A adaptação dos fluxos de água para atender eficazmente às demandas energéticas é um exemplo de como a inovação está sendo aplicada para melhorar a produção de energia [2].



A construção de **barragens hidrelétricas**, embora exija um investimento inicial substancial, resulta em uma **fonte de energia acessível e eficiente** uma vez que a usina esteja em operação. Esse investimento inicial é amplamente compensado pelos baixos custos operacionais e pela longa vida útil das instalações [3].

Existem diferentes tipos de **usinas hidrelétricas**, cada uma oferecendo benefícios únicos na geração de eletricidade. As **usinas de fio d'água**, por exemplo, dependem do fluxo contínuo de rios para gerar eletricidade sem a necessidade de grandes reservatórios [4].


Já as **usinas de armazenamento** são capazes de regular o fluxo de água para gerar energia de acordo com a demanda, proporcionando uma maior flexibilidade.

Por fim, as **usinas de bombeamento** armazenam energia em momentos de baixa demanda para ser utilizada quando a demanda aumenta, garantindo a estabilidade do fornecimento de eletricidade.

Portanto, a **energia hidrelétrica** não só contribui para a matriz energética de forma sustentável, mas também traz benefícios econômicos e sociais significativos .

No cenário global, a **energia hidrelétrica** é uma importante fonte de **energia renovável e de baixo carbono**. Existe um **amplo potencial de expansão da energia hidroelétrica** no futuro para ajudar a satisfazer a crescente procura de eletricidade impulsionada pelo crescimento socioeconômico, pela eletrificação dos setores de utilização final ou por outros fatores [5].

A expansão da **energia hidroelétrica** varia entre regiões e entre bacias dentro das regiões, devido a diferenças no potencial de recursos, custo, utilização atual e outros fatores.



Em suma, os cenários implicam em um **crescimento da produção hidroelétrica entre 36% e 119%** em 2050, em comparação com 2015, a nível global [5].

Funcionamento das Usinas Hidrelétricas

As **usinas hidrelétricas** funcionam aproveitando a energia da água que cai ou flui para gerar **eletricidade**. Os principais componentes de uma usina hidrelétrica são:

Barragem ou vertedouro: Estrutura que contém a água do rio, formando um reservatório e criando uma queda d'água utilizada para produzir energia.

Turbinas: A água que flui através da barragem, ou duto, que força as pás da turbina a girar, convertendo a energia cinética da água em energia mecânica.

Geradores: As turbinas em movimento estão conectadas a geradores que convertem a energia mecânica em energia elétrica.

Transformadores e linhas de transmissão: A eletricidade gerada sofre uma elevação em sua tensão elétrica (voltagem) e é transmitida através de linhas de energia para a rede elétrica.

A quantidade de eletricidade produzida depende **fluxo de água** e da **altura da queda d'água** [6]. Diferentes tipos de usinas hidrelétricas utilizam esses princípios de várias maneiras para gerar energia.

Tipos de Usinas Hidrelétricas

Existem vários **tipos de usinas hidrelétricas**, cada uma com suas próprias características e vantagens únicas:

» Usinas Hidrelétricas de Acumulação (Reservatório):

Possuem uma barragem de reservatório para armazenar água, produzem energia durante períodos de pico de demanda e mantêm um fluxo mínimo de água no rio abaixo durante a acumulação.

» **Usinas Hidrelétricas Derivativas:** Desviam parte de um rio para um canal de derivação, utilizando barragens ou represas com comportas, e geralmente estão a vários quilômetros do ponto de derivação.

» **Usinas Hidrelétricas de Fluxo Livre:** Mais adequadas para rios de baixa altitude, com barragens ou represas baixas e sem reservatório.

» **Usinas Hidrelétricas de Bombeamento:** Usam dois reservatórios em diferentes elevações interligados por condutos forçados, bombeiam água morro acima durante períodos de baixa demanda e liberam água morro abaixo para gerar energia durante períodos de alta demanda.

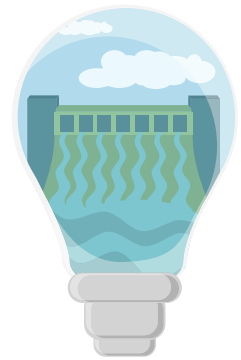
» **Usinas de fio d'água:** A energia hidroelétrica de pequena escala constitui uma tecnologia rentável para as regiões rurais dos países em desenvolvimento. A maioria das pequenas centrais hidrelétricas são do tipo fio d'água, que é muito diferente em design, aparência e impacto dos grandes projetos hidrelétricos convencionais. Não há reservatório de armazenamento de água, exceto a pequena capacidade do reservatório e toda a água desviada retorna para o riacho abaixo da casa de força, enquanto o impacto ambiental é menor.

Panorama da Energia Hidrelétrica no Brasil

O Brasil é um **líder global na geração de energia hidrelétrica**, com várias das maiores usinas hidrelétricas do mundo localizadas em seu território. Alguns fatos importantes sobre energia hidrelétrica no Brasil incluem [7, 8]:

O Brasil possui um potencial hidrelétrico total estimado em 260 GW, predominantemente localizado na Bacia Amazônica. Até 2021, mais de 60% desse potencial já havia sido aproveitado.

As cinco maiores usinas hidrelétricas em operação no Brasil são: **Belo Monte** (11.233 MW), **Tucuruí** (8.370 MW), **Itaipu** (7.000 MW, compartilhada com o Paraguai), **Jirau** (3.750 MW) e **Santo Antônio** (3.568 MW).



A energia hidrelétrica representa cerca de **70% da capacidade total de geração de eletricidade instalada no Brasil**, que ultrapassa 150 GW.

Panorama da Energia Hidrelétrica no Estado do Paraná

O estado do Paraná abriga **várias das principais usinas hidrelétricas** que contribuem significativamente para a geração de eletricidade do país. Alguns fatos importantes sobre **energia hidrelétrica no Paraná** incluem [9]:



Usina Itaipu Binacional. Fonte: PIXABAY. Itaipu Spillway Water Energy Light. Disponível no [link](#).

O estado tem uma **alta concentração de usinas hidrelétricas**, especialmente ao longo do Rio Paranapanema, que forma a fronteira entre Paraná e São Paulo.

Usinas hidrelétricas importantes no Paraná incluem: UHE Capivara, UHE Chavantes, UHE Rosana e UHE Salto Grande, todas localizadas no Rio Paranapanema.

A Usina Hidrelétrica de Itaipu, **uma das maiores do mundo**, está localizada no Rio Paraná entre o Paraná e o Paraguai, sendo uma grande contribuinte para o suprimento de eletricidade do estado.

No total, mais de 197.000 hectares de terra no Paraná são ocupados pelos reservatórios de **19 usinas hidrelétricas** no estado.

A **energia hidrelétrica é um componente crucial da matriz energética do Paraná**, proporcionando flexibilidade à rede elétrica ao regular o fluxo dos rios e transferir água de períodos úmidos para secos.

As usinas hidrelétricas e seus impactos sociais

As **usinas hidrelétricas** têm sido essenciais para o crescimento, fornecendo **recursos hídricos** e **eletricidade** às comunidades.

Nas últimas sete décadas, no entanto, as grandes barragens ampliaram seus **impactos ambientais e sociais**, causando a fragmentação e transformação dos rios [10].

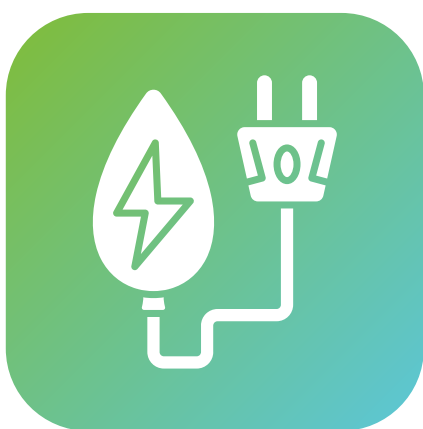


Estima-se que aproximadamente **80 milhões de pessoas tenham sido deslocadas** devido à **construção e operação dessas barragens**, com os reservatórios gerando o maior impacto ao inundar permanentemente grandes extensões de terra [10].

De fato, os **recursos naturais** atraem a fixação de pessoas, sendo os recursos hídricos de especial interesse. Assim, é comum que a implementação de um projeto hidrelétrico resulte no deslocamento de populações para beneficiar um maior número de pessoas através da **geração de energia**, prevenção de enchentes e secas, entre outros benefícios.

As barragens podem ter finalidades únicas ou múltiplas, influenciando a magnitude dos benefícios oferecidos. Ou seja, há uma **correlação significativa entre a construção de barragens e o desenvolvimento econômico de uma região** [10]. No entanto, é igualmente inegável a correlação entre a **construção dessas estruturas e o deslocamento de pessoas**.

Desafios associados à expansão da energia hidrelétrica no Brasil



Como já vimos, a **geração de energia hidrelétrica** é uma das **principais fontes de energia renovável no mundo**, conhecida por sua capacidade de fornecer grandes quantidades de eletricidade com baixa emissão de carbono.

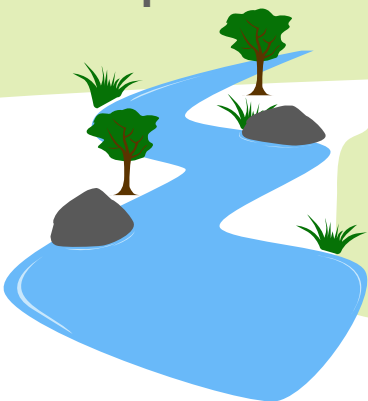
No entanto, essa modalidade energética enfrenta **diversos desafios ambientais, sociais e operacionais**.

Vamos explorar esses desafios, analisando os **impactos** e as questões associadas à implementação e operação de usinas hidrelétricas.

- **Considerações Socioambientais**

Os desafios para a **expansão futura da energia hidrelétrica** no Brasil incluem considerações **socioambientais**, com foco em projetos menos invasivos de fluxo contínuo e avaliações abrangentes de impacto.

É essencial balancear a necessidade de geração de energia com a **preservação ambiental** e o **respeito às comunidades locais** [10].



A construção de grandes barragens tem historicamente causado a fragmentação e transformação dos rios, além de deslocar populações e inundar extensas áreas de terra.

Portanto, **projetos hidrelétricos futuros** devem considerar essas questões para **minimizar os impactos negativos**.

- **Desafios Operacionais e Tecnológicos**

Apesar de o sistema elétrico brasileiro ser geralmente robusto, situações extremas podem comprometer o abastecimento de energia a curto prazo.

A **geração de energia hidrelétrica** depende de diversos fatores além do **volume de água nos reservatórios**, como a **eficiência das turbinas**, o **valor econômico da água armazenada** e as **normas de segurança** adotadas pelos operadores do sistema [11].

A **seca de 2021**, a mais severa registrada nos últimos 91 anos no Brasil, exemplifica bem esses desafios. A região Sudeste enfrentou uma situação crítica, **dependendo da energia acumulada no Nordeste**.

A **ausência de chuvas previstas agravou a situação, reduzindo drasticamente os níveis de água em todos os reservatórios**.

Mesmo com os esforços significativos do Brasil para **diversificar sua matriz energética** com fontes renováveis como **biomassa, eólica e solar**, o país ainda depende fortemente da **energia armazenada nos reservatórios hidrelétricos**.



A capacidade firme desses reservatórios é influenciada por dois fatores principais: **as condições hidrológicas e a eficiência das plantas**.

As **simulações hidrológicas de longo prazo** podem não incorporar totalmente os **impactos das mudanças climáticas**, e os modelos atualmente utilizados frequentemente não consideram a **perda gradual de eficiência dos equipamentos hidrelétricos** ao longo do tempo [11].

- ***Governança e Planejamento***

A **gestão dos recursos hídricos** e a valorização econômica de seus diversos usos são aspectos cruciais. Essa abordagem pode redefinir a **disponibilidade de água** considerada atualmente pelo setor elétrico, uma informação vital para o planejamento estratégico.

A **ausência de dados precisos** e a **carência de ferramentas computacionais avançadas** para planejamento e operação representam desafios significativos. Incorporar a resiliência do sistema a eventos extremos como um critério central no planejamento é essencial, o que certamente **contribuiria para uma matriz energética mais diversificada e robusta** [11].

Conclusão

Em resumo, a **energia hidrelétrica é vital para a matriz energética global** e, particularmente, para o Brasil. Com sua capacidade de **gerar energia limpa e renovável**, promover o desenvolvimento econômico e proporcionar flexibilidade à rede elétrica, as usinas hidrelétricas são essenciais para um futuro sustentável.



No entanto, é crucial **equilibrar a geração de energia com considerações socioambientais** para garantir um **desenvolvimento realmente sustentável**.

REFERÊNCIAS

[1] RAHMAN, Abidur; FARROK, Omar; HAQUE, Md Mejbaul. **Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 161, 2022. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>. Acesso em: 8 jul. 2024.

REFERÊNCIAS

- [2] SEBESTYÉN, Viktor. **Renewable and Sustainable Energy Reviews: Environmental impact networks of renewable energy power plants.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 151, 2021. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111626>. Acesso em: 8 jul. 2024.
- [3] RIBEIRO, F.; SILVA, G. **Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study.** *Journal of Cleaner Production*, v. 18, p. 44-54, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2009.09.006>. Acesso em: 8 jul. 2024.
- [4] ANAGNOSTOPOULOS, John S.; PAPANTONIS, Dimitris E. **Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant.** *Energy Conversion and Management*, v. 48, n. 10, p. 2663-2670, 2007. ISSN 0196-8904. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.04.016>. Acesso em: 8 jul. 2024.
- [5] ZHANG, Y.; BINSTED, M.; IYER, G.; KIM, S.; WILD, T.; ZHAO, M. **Long-term basin-scale hydropower expansion under alternative scenarios in a global multisector model.** *Environmental Research Letters*, v. 17, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9ac9>. Acesso em: 8 jul. 2024.
- [6] NASIR, L.; ONCHE, E.; SERIKI, O. **Modification, Simulation and Demonstration of Laboratory Scale Pelton Turbine for Waterfall Hydropower Plant.** *ABUAD Journal of Engineering Research and Development*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.53982/ajerd.2023.0602.07-j>. Acesso em: 8 jul. 2024.
- [7] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico.** Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-nacional-energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico>. Acesso em: 8 jul. 2024.

REFERÊNCIAS

- [8] MASSARA, V. **The use of hydroelectric plants in Brazil - brief overview.** MOJ Civil Engineering, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.15406/mojce.2019.05.00154>. Acesso em: 8 jul. 2024.
- [9] BUENO, E.; ALVES, G.; MELLO, C. **Hydroelectricity water footprint in Parana Hydrograph Region, Brazil.** Renewable Energy, v. 162, p. 596-612, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.047>. Acesso em: 8 jul. 2024.
- [10] ROMERO, J.; RANGEL, M.; AGUILAR, J.; VALENCIA, A.; ACLE, J.; GUTIERREZ, L.; CANO, H. **Relationship between the main economic, environmental and social impacts of hydroelectric dams. Brazilian Journal of Development,** 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n10-100>. Acesso em: 8 jul. 2024.
- [11] BANCO MUNDIAL. **Os desafios do planejamento de sistemas hidrelétricos.** Disponível em: <https://www.worldbank.org/pt/news/opinion/2021/09/06/os-desafios-do-planejamento-de-sistemas-hidreletricos>. Acesso em: 8 jul. 2024.

b. Energia Eólica

(Luiz Fernando Cótica)

Introdução

A disponibilidade de energia é essencial tanto para o desenvolvimento nacional como para o bem-estar da população, por isso é considerada o pilar do crescimento económico.

A contínua industrialização e o crescimento da economia global dependem fortemente da **disponibilidade de fontes de energia confiáveis e eficientes para alimentar nosso planeta.**



No entanto, cada atividade de **conversão e transmissão de energia** afeta o meio ambiente de diferentes maneiras e em diferentes graus. A **combustão de combustíveis fósseis**, por exemplo, pode contaminar a terra, o ar e a água, prejudicando o ambiente e a vida selvagem, ao mesmo tempo que acelera o aquecimento global [1].



Por outro lado, as **energias renováveis**, como a **eólica**, oferecem uma **solução alternativa** e promissora para os desafios sociais e ambientais causados pelos combustíveis fósseis.

A **energia eólica**, em particular, tem se destacado como uma **fonte limpa e sustentável**, que pode ser explorada de maneira a **minimizar os impactos ambientais**, ao mesmo tempo em que gera empregos, promove o desenvolvimento tecnológico e contribui para a segurança energética [2].

A adoção de energias renováveis está alinhada com os **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)** adotados pelas Nações Unidas em 2015, que visam **erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir que todas as pessoas desfrutem de paz e prosperidade** até 2030 [3].



A adoção de energias renováveis está alinhada com os **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)** adotados pelas Nações Unidas em 2015,

Portanto, o objetivo é explorar detalhadamente a **energia eólica**, destacando seus inúmeros benefícios, como a **redução das emissões de gases de efeito estufa** e a **diversificação da matriz energética**.


Também abordar o funcionamento dos **aerogeradores**, os **desafios tecnológicos e logísticos** envolvidos na expansão da energia eólica, e a importância crucial dessa fonte de energia na **transição para uma matriz energética mais sustentável e resiliente**.

Benefícios da Energia Eólica

A **energia eólica** é uma **fonte renovável** que oferece inúmeros **benefícios ambientais e econômicos**, se destacando como uma **solução limpa, renovável e sustentável**, reduzindo o uso de combustíveis fósseis e ajudando a combater as mudanças climáticas [4].



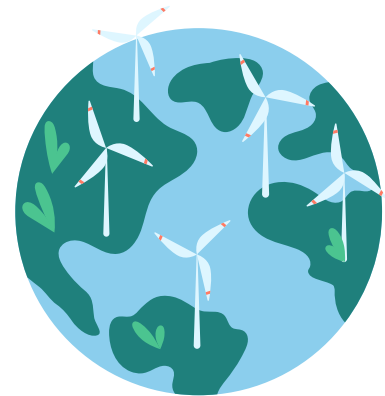
Esse tipo de energia gera eletricidade sem **emissões de gases de efeito estufa ou poluição do ar**, contribuindo de forma significativa para a preservação ambiental.



Além disso, a **energia eólica** é uma das **fontes de energia mais baratas disponíveis atualmente**. O custo de geração caiu substancialmente devido aos avanços tecnológicos e às economias de escala, tornando-se uma opção economicamente viável para muitas regiões [5].

A implementação de projetos eólicos também impulsiona a **geração de empregos e o crescimento econômico**. A indústria eólica emprega milhares de pessoas e gera bilhões em impostos, **beneficiando tanto a economia local quanto a nacional** [6].

A **versatilidade da energia eólica** permite sua integração em diversos ambientes, como áreas rurais, fazendas, ranchos e comunidades costeiras.



Comparada a plantas de combustíveis fósseis, as **fazendas eólicas requerem menos espaço**, o que facilita sua implantação em diferentes locais [6].

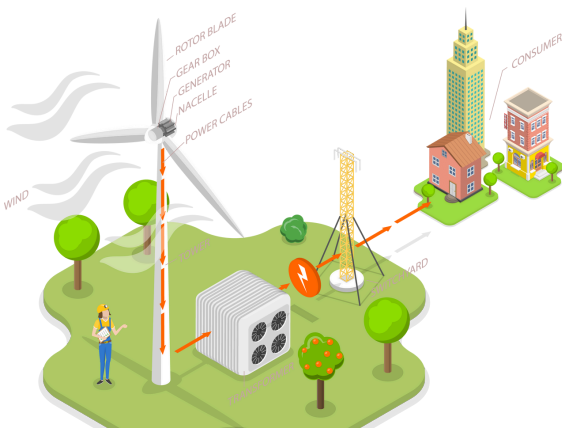


Outra vantagem da **energia eólica** é que ela é um recurso **abundante e inesgotável**, disponível em muitas regiões. Isso ajuda a reduzir as importações de energia e a criar riqueza local.

Além disso, a energia eólica tem um **impacto ambiental significativamente reduzido**. Não contamina, não gera resíduos e não consome grandes quantidades de água, características que são especialmente importantes em um contexto de escassez hídrica.

Com medidas de mitigação adequadas, os impactos sobre a vida selvagem podem ser minimizados ainda mais, tornando a **energia eólica uma escolha sensata e sustentável para o futuro**.

Funcionamento das Usinas de Energia Eólica

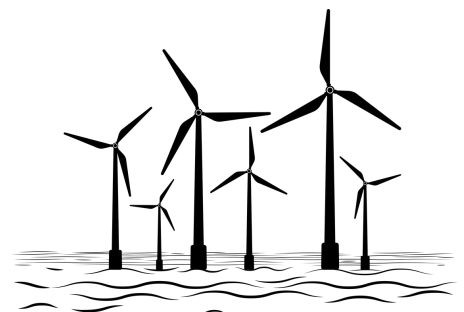


As **usinas de energia eólica**, também conhecidas como **fazendas eólicas**, aproveitam a **energia cinética do vento** para gerar eletricidade.

As turbinas eólicas consistem em pás, uma nacelle e um eixo. Quando vento sopra, faz as pás girarem, criando **energia cinética** que é convertida em **energia elétrica por um gerador na nacelle** [7].

As **turbinas eólicas** podem ser de **eixo horizontal ou vertical**. As turbinas de eixo horizontal pivotam no topo da torre para enfrentar o vento, enquanto as turbinas de eixo vertical são omnidirecionais e não precisam se ajustar à direção do vento para funcionar.

As **fazendas eólicas** podem ser construídas em terra ou no mar, com as turbinas *offshore* sendo capazes de **capturar ventos oceânicos poderosos** [8].



A eletricidade gerada é transmitida para a rede elétrica por meio de uma série de etapas que incluem **geração, transformação, transmissão e distribuição**. Esse processo garante que a eletricidade gerada pelas turbinas eólicas seja integrada de forma eficiente na rede elétrica nacional.

Desafios e Efeitos Colaterais

Apesar dos inúmeros benefícios, a **energia eólica enfrenta desafios** e preocupações que precisam ser abordados para garantir sua viabilidade a longo prazo.

Um dos principais desafios é a intermitência e variabilidade do vento, que dificulta a manutenção do equilíbrio entre oferta e demanda, bem como a estabilidade da rede elétrica.

Para mitigar esses problemas, são necessários **métodos eficazes de previsão, armazenamento de energia e coordenação com outras fontes energéticas**.

Além disso, embora a **energia eólica** seja geralmente benigna ao meio ambiente, ela pode ter **impactos significativos na vida selvagem e nos humanos**. Estudos de ciclo de vida mostram **variações nas emissões de CO2 associadas à energia eólica**, dependendo da localização e do tamanho das turbinas [9].

Outros impactos incluem efeitos na **biodiversidade, poluição sonora e efeitos visuais**, que podem ser mais pronunciados em determinadas áreas.



A **infraestrutura de transmissão** também representa um desafio significativo. A **construção de parques eólicos** em áreas remotas, onde os recursos eólicos são mais abundantes, requer uma **extensa rede de transmissão**, o que pode ser caro e demorado.

Além disso, esses projetos frequentemente enfrentam **restrições ambientais e sociais** que podem complicar sua implementação.

Por fim, a **integração de turbinas eólicas com edifícios apresenta desafios específicos**, como a interrupção do fluxo de vento, a otimização de locais e os requisitos de engenharia estrutural.



Esses fatores podem impactar o **desempenho e a segurança das turbinas**, exigindo soluções inovadoras e cuidadoso planejamento para serem superados.

Panorama Global e Brasileiro

No ano de 2018, o mercado global de **energia eólica cresceu 51 GW**, atingindo uma capacidade instalada total de 591 GW. **A maioria das turbinas eólicas do mundo (96%) são turbinas em terra.**



A **China** lidera mundialmente com aproximadamente 210 GW de capacidade instalada, seguida pelos **EUA, Alemanha e Índia**. O **Brasil**, por sua vez, **ocupa o sexto lugar mundial** com 24 GW de capacidade instalada em terra até o Relatório Global de Energia Eólica de 2023 [10].

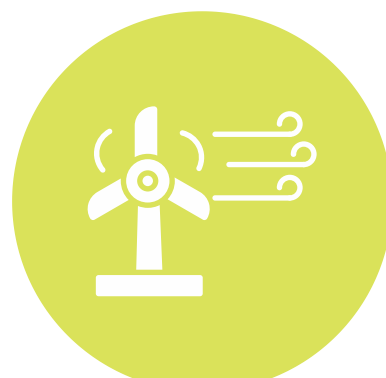
O Brasil viu **investimentos substanciais em energia eólica**, com mais de US\$ 42 bilhões investidos no setor nos últimos 11 anos. O sucesso do país pode ser atribuído a **condições favoráveis de vento**, uma **robusta cadeia de produção local** e um **significativo potencial de crescimento adicional**, estimado em mais de 700 GW em terra [10].

Projetos de energia eólica offshore estão em expansão, com 20 projetos na fase de licenciamento que poderiam adicionar 42 GW de energia à rede nos próximos cinco anos [11, 12].

Energia Eólica no Estado do Paraná

O estado do Paraná possui uma **presença significativa de parques eólicos**, contribuindo para o cenário de energia renovável do Brasil.

Embora a maior parte da **capacidade eólica brasileira** esteja concentrada nas **regiões Nordeste e Sul**, o Paraná desempenha um papel importante, apesar de ter uma capacidade instalada menor em comparação com outras regiões [13].



Até 2022, o estado contava com uma capacidade instalada total de 2,5 MW em diversos parques eólicos [13].

O setor de energia eólica no Paraná faz parte de um esforço mais amplo para **umentar o uso de fontes de energia renovável no Brasil**, com o objetivo de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e **mitigar os impactos das mudanças climáticas**.

Além da **energia eólica**, o estado também abriga **usinas hidrelétricas**, refletindo seu compromisso com a geração de energia sustentável .

Conclusão

A **energia eólica** é um pilar fundamental para o futuro sistema de energia de baixo carbono. Com seus muitos benefícios, incluindo a **redução das emissões de gases de efeito estufa**, a **geração de empregos** e o **impacto ambiental reduzido**, a energia eólica se destaca como uma das **fontes de energia renovável mais importantes do mundo**.

No entanto, é crucial continuar a pesquisa e o desenvolvimento para **mitigar os desafios e efeitos colaterais associados**, garantindo uma transição sustentável e eficiente para um futuro energético mais limpo.

REFERÊNCIAS

- [1] BAUMANN, F. **The systemic challenge of global heating**. International Politics Review, v. 6, p. 134-144, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1057/s41312-018-0065-5>. Acesso em: 08 jul. 2024.
- [2] BLAABJERG, F.; MA, K. **Wind Energy Systems. Proceedings of the IEEE**, v. 105, p. 2116-2131, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2695485>. Acesso em: 08 jul. 2024.
- [3] ONU Brasil. **Onu Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 08 jul. 2024.
- [4] **Wind energy handbook**. Choice Reviews Online, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5860/choice.49-2091>. Acesso em: 08 jul. 2024

REFERÊNCIAS

[5] ØSTERGAARD, P. A.; DUIC, N.; NOOROLLAHI, Y.; MIKULCIC, H.; KALOGIROU, S. **Sustainable development using renewable energy technology**. Elsevier, 2020.

[6] **State of Green. The economic benefits of wind energy**. Disponível em: <https://stateofgreen.com/en/news/the-economic-benefits-of-wind-energy/>. Acesso em: 08 jul. 2024.

[7] U.S. Department of Energy. **How wind turbine works**. Disponível em: <https://www.energy.gov/articles/how-wind-turbine-works>. Acesso em: 08 jul. 2024.

[8] U.S. Department of Energy. **Top 10 things you didn't know about offshore wind energy**. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/top-10-things-you-didnt-know-about-offshore-wind-energy>. Acesso em: 08 jul. 2024.

[9] MELLO, G.; DIAS, M. F.; ROBAINA, M. **Wind farms life cycle assessment review: CO2 emissions and climate change**. Energy Reports, v. 6, suplemento 8, p. 214-219, 2020. ISSN 2352-4847. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.104>. Acesso em: 08 jul. 2024.

[10] GlobalData. **Brazil wind power market analysis**. Disponível em: <https://www.globaldata.com/store/report/brazil-wind-power-market-analysis/>. Acesso em: 08 jul. 2024.

[11] InfoMoney. **Eólica offshore pode ser nova energia hidrelétrica do Brasil, diz Banco Mundial**. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/economia/eolica-offshore-pode-ser-nova-energia-hidreletrica-do-brasil-diz-banco-mundial/>. Acesso em: 08 jul. 2024.

REFERÊNCIAS

[12] GONZÁLEZ, M. O. A.; SANTISO, A. M.; MELO, D. C.; VASCONCELOS, R. M. de. **Regulation for offshore wind power development in Brazil.** Energy Policy, v. 145, 2020. ISSN 0301-4215. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111756>. Acesso em: 08 jul. 2024.

[13] LUCENA, J. de A. Y.; LUCENA, K. A. A. **Wind energy in Brazil: an overview and perspectives under the triple bottom line.** Clean Energy, v. 3, n. 2, p. 69–84, jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ce/zkz001>. Acesso em: 08 jul. 2024.

d. Energia Fotovoltaica (Solar)

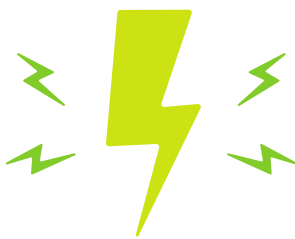
(Eduardo Augusto Castelli Astrath)

O conceito de energia acompanha a jornada da humanidade desde os tempos mais remotos, com os primeiros seres humanos buscando alimentos para sua subsistência diária, passando pela idade média, por volta de 1400 d.C., com as primeiras utilizações organizadas de fontes energéticas como **quedas d'água, carvão mineral e petróleo.**

Esses avanços culminaram na **Revolução Industrial** de 1875, marcada pelo desenvolvimento da máquina a vapor, revolucionando a capacidade produtiva industrial.



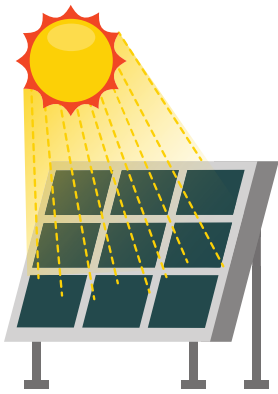
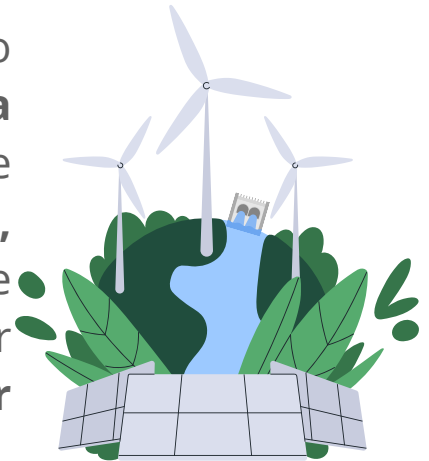
Mais tarde, no século XX, o **aprimoramento da máquina a vapor**, levou ao surgimento de **motores a combustão interna** alimentados por derivados de petróleo, o que incrementou significativamente a dependência global desse recurso.



Atualmente, a **eletricidade é a principal fonte de luz, calor e força que a sociedade moderna tem a sua disposição**, de maneira que tudo a sua volta se resume em uso de eletricidade.

Isso fez com que a **preocupação com a manutenção e preservação do meio ambiente** e a **intensa procura pela diversificação das matrizes elétricas** ganha-se um olhar mais cuidadoso, principalmente pelos países que procuram uma maneira de **diminuir a emissão de gases poluentes na atmosfera**, causados principalmente pelas fontes de carvão, como também diminuir o aquecimento global, conforme acordo firmado no **acordo de Paris** em Dezembro de 2016 na 21° COP21.

Hoje em dia, tanto no Brasil como por todo mundo, existe uma gama de **matrizes para a geração de energia elétrica**, sendo as de maior destaque **usinas hidroelétricas, termoeletricas e nucleares**, bem como de maneira menos intensa as produzidas por meio de **energia eólica, biomassa, solar entre outras**.



Dentro desse cenário em busca de melhorias e proteção ao meio ambiente, a **energia proveniente do Sol**, que pode ser ramificada em diversos processos, vem ganhando cada vez mais um destaque em seu desenvolvimento e aperfeiçoamento, principalmente no que se remete a geração de **energia Fotovoltaica** (Energia gerada através da conversão direta de radiação solar em eletricidade), uma vez que seu campo econômico tem se ampliado nos últimos anos e os olhares acadêmicos tem se intensificado por todo planeta

Radiação Solar

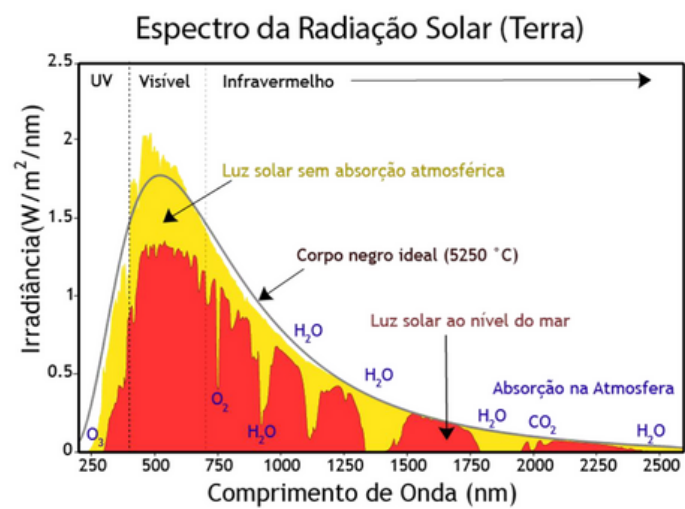
A energia proveniente da **radiação solar** é classificada como uma fonte de **energia renovável**, ou seja, uma forma de geração de energia que não afeta o meio ambiente e o clima da Terra, uma vez que **não libera gases poluentes que ajudam a ampliar o efeito estufa**

De fato, o Sol é a **fonte de energia natural da Terra**, sendo ele responsável pela **circulação das correntes globais dos ventos** e dos oceanos, pelo **ciclo de evaporação e condensação da água** que por sua vez cria rios e lagos, como também é responsável pelos **ciclos da vida, ciclos biológicos e da fotossíntese**.

A energia vinda do Sol é gerada através do **processo de fusão nuclear** que ocorre por meio da combinação de dois átomos de **Hidrogênio formando um átomo de Hélio**.

Durante este processo, parte da massa é “perdida”, liberando uma gigantesca quantidade de energia que é transmitida para a Terra em forma de ondas **eletromagnéticas** (radiação solar).

Todo este processo de fusão no interior do Sol ocorre em **elevadas temperaturas** e com diferentes faixas espectrais de acordo com o tipo de interação com a matéria, de maneira que a região espectral dessa radiação se encontra em diferentes regiões (Figura 1).



Por outro lado, a radiação emitida pelo Sol também depende de sua temperatura, o que é chamado de **radiação térmica**. Isso faz com que de alguma parte, a radiação emitida dependa de algum modo de sua composição.



Assim de forma geral, quando a **temperatura do Sol** é estimada pela lei de **deslocamento de Wien** devido a seu espectro de emissão, o mesmo se assemelha radiação de um corpo negro (Corpo Negro é aquele que emite toda radiação por ele recebida, sendo sua radiação determinada pela sua temperatura e pelo comprimento de onda, conforme descritos pela Lei de Planck) a temperatura de ~5800K (considerada temperatura da fotosfera).

Assim, através da **Lei de Stefan-Boltzmann** (Eq. 1) que mostra a relação direta entre temperatura e energia emitida por um corpo, é possível quantificar a chamada **Irradiância Solar Total** (Total Solar Irradiance - TSI) **do Sol**.

Através dela, é de fácil análise que corpos de **maior temperatura apresentam uma maior emissão por unidade de área**, quando comparado a corpos de menor temperatura.

(1)

$$P = \sigma \cdot T^4 \cdot A$$

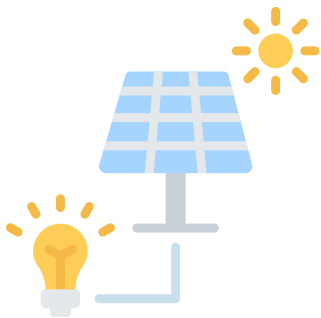
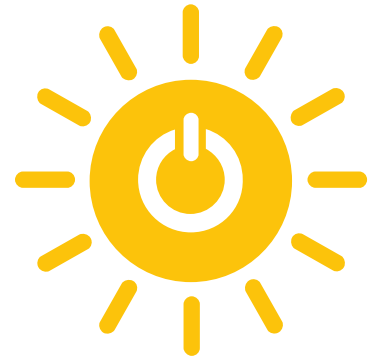
sendo P a **Irradiância Solar Total** à temperatura de $T = 5800 \text{ K}$, a constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ T}^{-4}$, e a área da superfície $A = 4\pi R^2$. No caso do Sol é necessário usar a razão entre o raio da Superfície de Sol, $R_s = 6,95700 \times 10^8 \text{ m}$ e o raio de uma esfera de $R_e = 1 \text{ UA} = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$, que é a distância entre o Sol e a Terra. Logo, a equação se torna a seguinte;

(2)

$$A = 4\pi \left(\frac{R_s}{R_e} \right)^2$$

Assim, a Irradiância que atinge a Terra é da ordem de $P \sim 1,367 \text{ Wm}^{-2}$. Esse valor pode variar em até 1,5 % de acordo com o método usado para aferição (balão meteorológico, aviões e até mesmo naves espaciais).

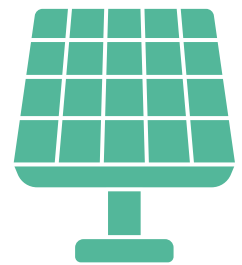
Mesmo que **aproximadamente 30% da energia solar atinja a Terra** devido aos processos de reflexão, refração entre outros, dados de 2017 mostram que a energia que o Sol produz em uma hora, equivale **a toda energia produzida** (desperdiçada e consumida) **pelo mundo neste mesmo ano.**



Em meio a toda essa abundância proveniente do Sol, **aprimoramentos em matrizes de energia vindas do sol**, ganham cada vez mais espaço. Dentre elas, a geração de eletricidade por meio do **efeito fotovoltaico** em células solares (painéis solares), vem ganhando um maior destaque nos últimos anos.

Célula Solar e Semicondutores

Desde que a tecnologia fotovoltaica foi descoberta pelo físico francês **Edmond Becquerel** em 1839, que ao analisar placas metálicas formadas por platina ou prata mergulhadas em um **eletrólito**, ocorria o surgimento de uma pequena diferença de potencial quando as placas eram expostas a luz solar, o **efeito fotovoltaico** vem sendo utilizado em variadas práticas experimentais que **transformam energia solar em energia elétrica.**



Os estudos que envolvem o aperfeiçoamento e desenvolvimento das células solares vêm se aperfeiçoando desde que Adams e Day em 1876, gerou a primeira célula solar fotovoltaica composta por no Selênio, com rendimento estimado em 1%.

Vários foram os estudos em torno deste efeito, buscando sempre melhorias e materiais que apresentassem melhor rendimento.

Em 1905, com a explicação do **efeito fotoelétrico** feito por Albert Einstein e sua comprovação experimental em 1926 por Millikan, elevaram as contribuições teóricas para a continuidade do estudo fotovoltaico.

Em 1918 Czochralski desenvolveu um **processo de crescimento de Silício através de um único cristal**, porém somente em 1954, através dos cientistas D. M. Chapin, C. S. Fuller, e G. L. Pearson do *Bell Telephone Laboratories em New Jersey*, que a **aplicação fotovoltaica atingiu sua era moderna**, quando os mesmos fabricaram uma célula solar de Silício de junção pn (p → positivo, n → negativo) que atingiu uma eficiência de 5% a 6%.

Atualmente o Silício (monocristalino, policristalino e amorfo) ainda atua como o material mais usado.

Na chamada **“corrida espacial”** os painéis solares tiveram um grande impulso, principalmente por parte do programa espacial dos Estados Unidos (USA) e a antiga URSS, sendo utilizados para o **fornecimento de energia que alimentava os satélites lançados ao espaço.**



Porém seu elevado custo, fez com que a fabricação e aplicação terrestre não fossem feitas em larga escala.

Mais tarde, na década de 70, com a **escassez do petróleo**, houve um pensamento de que a **energia solar poderia contribuir de modo significativo para a procura de energia mundial**, porém devido ao curto tempo de crise do petróleo o desenvolvimento da energia fotovoltaica mais uma vez ficou emperrado.

De forma geral, a **energia fotovoltaica** começou a ganhar reconhecimento quando países como Alemanha e Japão perceberam que, para alcançar um maior desenvolvimento, não era necessária apenas uma evolução tecnológica, mas também um **incentivo para fomentar críticas ao mercado**.



Isso consolidou a **energia fotovoltaica** não apenas como um experimento de laboratório, mas também como uma **atividade industrial**.

Assim, a busca por dispositivos que **convertam luz solar em energia** (células solares) de forma confiável e rentável segue diversos caminhos. A combinação ideal para esses dispositivos seria a **utilização de uma quantidade reduzida de material com alta eficiência**, permitindo a competição com as células solares convencionais de silício (também chamadas de Primeira Geração), que representam até 90% do mercado.

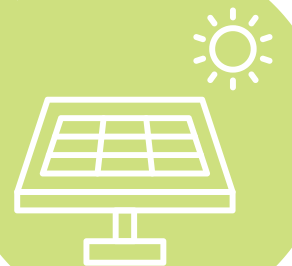
Dessa forma, a tecnologia de células solares feitas com filmes finos tem ganhado cada vez mais espaço nas pesquisas, com o objetivo de, no futuro, competir com as tradicionais, tanto em termos de rentabilidade quanto de eficiência.

Tais células são formadas por **materiais fotossensíveis**, depositados sobre materiais de baixo custo, como **polímeros, vidros, plásticos** ou **metais condutores**, e revestidas por acrílico ou vidro.

Os materiais mais usados para a fabricação de filmes finos fotovoltaicos tem sido o **silício amorfo** (a-Si), **Telureto de Cádmi**o (CdTe) e **Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio** (CIGS), cada uma delas com suas particularidades.

Por outro lado, células solares produzidas com **compostos ferroelétricos** vêm ganhando cada vez mais espaço, tendo como destaque: a **Ferrita de Bismuto** (BiFeO₃) devido ao controle de sua deposição pelas mais variadas técnicas, e as chamadas **perovskitas híbridas de halogeneto orgânico-inorgânico**, destacando CH₃NH₃PbI₃ (MAPI), pelo potencial de rendimento.

Assim, o **efeito fotovoltaico**, base de funcionamento de uma célula solar, é melhor compreendido ao analisar as propriedades básicas de um material semicondutor, como também a teoria que descreve o **efeito fotoelétrico**.



O grande interesse no **desenvolvimento de materiais semicondutores** está relacionado, principalmente, às **propriedades elétricas, magnéticas, ópticas e mecânicas** o que permite uma gama de aplicações, que vão desde transistores, células fotovoltaicas, sensores, fotocatalisadores etc

As propriedades de um semiconductor ou de um metal são explicadas pela **teoria das bandas**. Essa teoria descreve os níveis de energia que os elétrons podem ocupar em um sólido, uma consequência direta do princípio de exclusão de Pauli, onde a principal diferença está no fato de que o aumento de temperatura diminui a condutividade dos metais, porém aumenta para os semicondutores.

As chamadas bandas surgem do **conceito de interação entre os átomos**, ou seja, ao considerar um sólido composto por diversos átomos ($\sim 10^{23}$ por exemplo) próximos uns dos outros, tem-se que o nível de energia de cada átomo é influenciado pelos demais, tendo como consequência uma divisão ligeiramente distinta dos níveis de energia.

Logo, o efeito de junção de um grande número de átomos, formam as chamadas **bandas de energia** (níveis de energia praticamente contínuo, Figura 2) que ficam separadas por lacunas (Banda proibida) onde não existem elétrons.

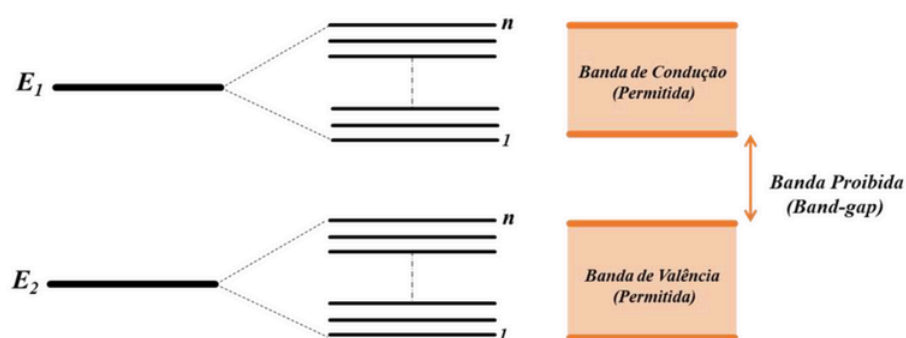


Figura 2 1– Exemplificação das bandas de energia em um sólido

Tais bandas de energia se encontram acima e abaixo da chamada banda proibida também chamada de **energia de Fermi** (*Band-gap*) onde a relação entre os níveis de energia e a ocupação dos estados é feita através da **estatística de Fermi-Dirac**, que leva em conta o princípio de **exclusão de Pauli** (Fig. 2).

Elas são chamadas respectivamente de bandas de condução com energia E_c e bandas de valência com energia E_v . Uma representação da eficiência de energia entre os materiais **sólidos condutores** (a), **semicondutores** (b) e **isolantes** (c) em termos do *Band-gap* é evidenciado na **Figura 3**.

Os semicondutores, à temperatura de 0K, apresentam uma banda de valência totalmente preenchida e uma banda de condução totalmente vazia separadas por um *Band-gap* de menor largura, quando comparado com os materiais isolantes.

Desta forma por terem um menor **band-gap** (por volta de 1 eV), quando expostos a temperaturas ambiente ou superiores, alguns elétrons podem ser **excitados termicamente e deslocados para a banda de condução**, formando então dois portadores de carga, uma lacuna e um elétron.

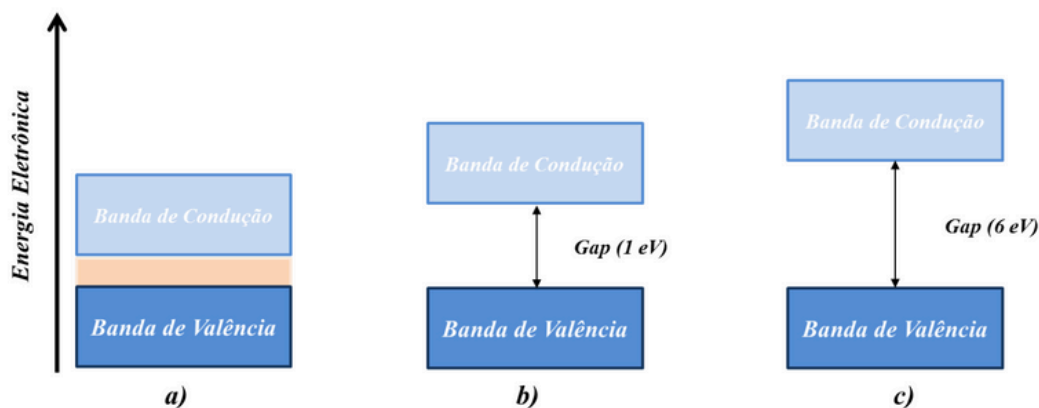


Figura 3 - Representação das bandas proibidas (gap) entre os materiais sólidos: condutores (a), semicondutores (b) e isolantes (c).

A energia mínima necessária para que um elétron possa romper a região de *Bandgap* é dada pela equação 3.

$$E_g = E_c - E_v \quad (3)$$

Os **semicondutores** são materiais que apresentam uma característica bastante importante relacionado a sua condutividade. Isso ocorre porque os mesmos são **sensíveis a impurezas inseridas em sua estrutura** (processo de dopagem), o que leva os materiais semicondutores a serem classificados de duas maneiras diferentes: **intrínsecos e extrínsecos**.

Os **intrínsecos ou semicondutores puros**, são aqueles que a concentração de elétrons livres na banda de condução é a mesma que a de buracos na banda de valência, de maneira que suas propriedades intrínsecas (próprias) são responsáveis pela condutividade elétrica.

O **silício é um exemplo deste tipo de material**, uma vez que ele tem uma estrutura cúbica com ligações covalentes fortemente direcionais, o que o torna um semicondutor intrínseco.

No caso do **crystal de silício** ser submetido a uma temperatura de aproximadamente 20 °C, a **energia térmica fornecida é suficiente para excitar um elétron** que se encontra na banda de valência e **fazê-lo saltar até a banda de condução**.

Quando isso ocorre, o mesmo deixa um **"buraco"** ou **lacunas na banda de valência**. Assim são criados dois transportadores de carga, sendo um o **elétron carregado com carga negativa** e o outro a **lacuna carregada positivamente**, de forma que na presença de um campo elétrico externo, esse par (lacuna e elétrons) transportam **corrente elétrica** (Figura 4).

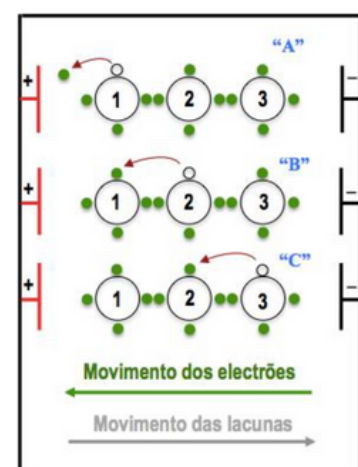


Figura 4 - Representação esquemática da movimentação de elétrons e lacunas quando o material é sujeito a um campo elétrico externo. Em "A" existe uma lacuna na região 1, que é posteriormente preenchida por um elétron. Assim essa lacuna se "desloca" para o ponto 2 em "B", e novamente é preenchida por outros elétrons. Isso ocorre de maneira sucessiva, surgindo então uma corrente.

Já **semicondutores extrínsecos ou semicondutores dopados**, uma adição controlada de impurezas (introdução de átomos de outros materiais) ocorre em sua estrutura cristalina, processo esse conhecido como dopagem.

Por exemplo, a **dopagem do Silício** pode ser feita por dois elementos, **Fósforo (P)** e **Boro (B)**. A **figura 5**, ilustra esquematicamente a **dopagem do silício com átomos de fósforo**, havendo assim um excesso de um elétron, uma vez que o silício apresenta apenas quatro elétrons em sua camada de valência e o fósforo cinco elétrons.

Esses **elétrons extra** fica **fracamente ligado ao núcleo dos átomos de Fósforo**, de modo que quando submetido a uma pequena quantidade de energia externa (por exemplo, a luz solar) tem a possibilidade de ficar livre para movimentar-se na estrutura e, conseqüentemente, **conduzir corrente elétrica**.

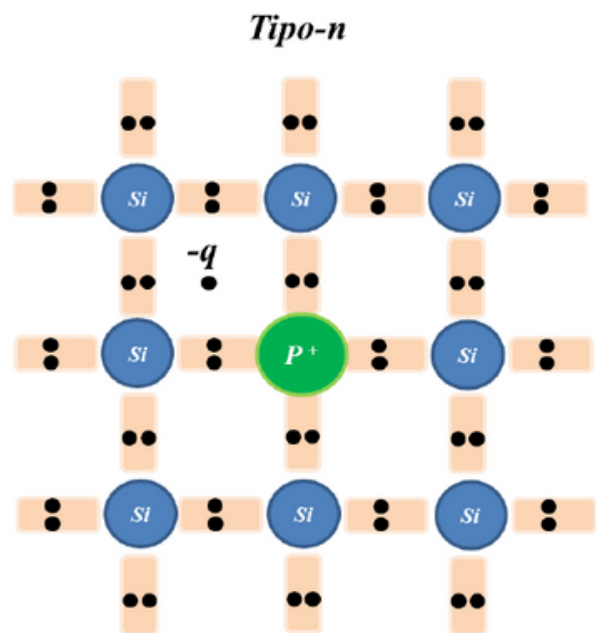


Figura 5 - Representação da rede Silício dopado com Fósforo.

Como houve uma **doação de elétrons pelo átomo de Fósforo**, a estrutura fica configurada como uma junção tipo n (tipo negativa).

Já quando o **Silício é dopado com Boro** (figura 6), que por sua vez é um elemento trivalente, o mesmo fará com que apareça uma lacuna (“buraco”) na estrutura cristalina.

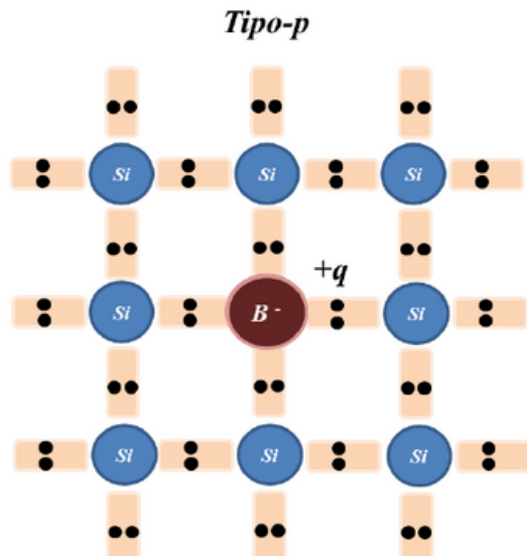


Figura 6 – Representação da rede de Silício dopado com Boro.

Nessas condições, quando submetido a uma pequena quantidade de energia pode ocorrer o **deslocamento de um elétron de um dos átomos de silício vizinho**, ocorrendo então um preenchimento da **lacuna do átomo de Boro**. Logo, a estrutura fica configurada como uma **junção do tipo p**.

Dessa forma, os **semicondutores do tipo p e do tipo n** são mais eficientes quando comparado com o silício puro. Porém, quando separadas, não acrescentam em nada no desenvolvimento de células solares em termos de condutividade.

Já quando são colocadas juntas, formando o que é chamado de junção pn, e submetidas à incidência da luz solar, fazem surgir o **efeito fotovoltaico**.

Efeito Fotovoltaico e Fotoelétrico

O funcionamento da **junção pn**, quando submetida à incidência solar, é melhor compreendido ao analisar o **efeito fotoelétrico** proposto por Albert Einstein em 1905. Esse efeito, que lhe rendeu o Prêmio Nobel, comprova o comportamento corpuscular da luz

Einstein mostrou que quando um feixe de luz com uma determinada frequência f atinge uma superfície metálica, ocorre uma interação entre fótons que compõe a luz e os elétrons da superfície (Figura 7).

ENERGIA SOLAR - FÓTONS

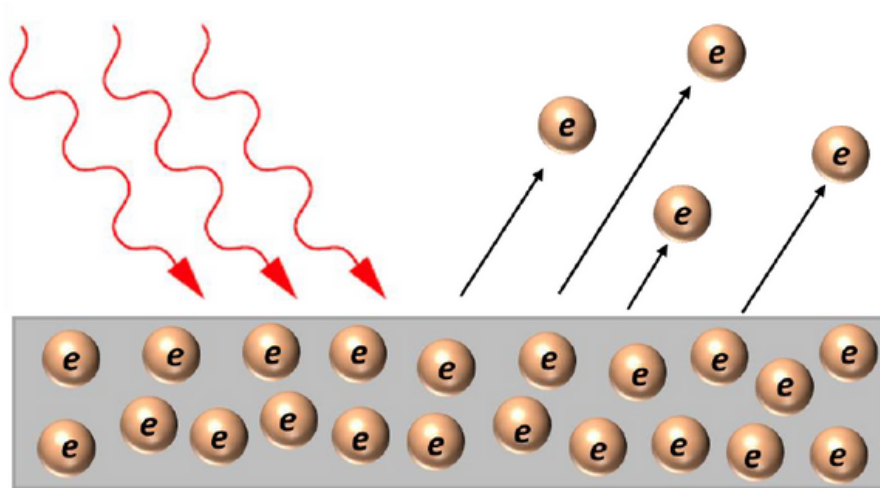


Figura 7 - Representação do efeito Fotoelétrico em uma superfície metálica.

Em seu estudo, Einstein comprovou que a energia cinética E_c adquirida pelos elétrons quando expelidos do metal era independente da intensidade da luz que incidia sobre a superfície, algo que perante a mecânica clássica não seria possível.

Para ele, a energia luminosa transportada pela luz (ondas eletromagnéticas) incidente no metal era **quantizada em pequenas porções**, ao qual ele nomeou como sendo **Fótons**, e cada elétron só poderia absorver a energia vinda de um único fóton, que por sua vez, desapareceria após o feito.

A energia transferida por fótons é calculada da seguinte maneira:

$$E = h \cdot f \quad (4)$$

sendo f a frequência com que os fótons atingem a superfície e h a constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s). Assim, o elétron atingido por um fóton, absorve a energia proveniente do mesmo, adquirindo uma energia cinética (E_c) que obedece a seguinte equação:

$$E_c = h.f - w \quad (5)$$

sendo w a função trabalho, uma característica específica do material que compõe a superfície metálica e indica a dificuldade que o elétron enfrentará para ser expelido do material. Se o valor desta energia for maior que o *band-gap*, ou maior que a função trabalho, o elétron então é expelido do material.

Com base neste raciocínio, **quando ocorre a incidência de luz em um semicondutor de junção pn**, certa quantidade de **energia é transferida para essa junção através dos fótons** que compõem a luz.

Se essa energia for superior a energia de *band-gap*, ocorre uma **fotogeração de pares elétrons-lacuna** devido a “promoção” dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, dando origem a um campo elétrico que orienta a movimentação dos elétrons no sentido da junção n para a junção p, ocasionado uma **diferença de potencial V**.

Para que a célula fotovoltaica fique completa, é necessária que haja um **contato metálico**, tanto na região da junção n, como também na região na junção p, para que possa haver uma **circulação dos elétrons** (Fig. 8(a)), e conseqüentemente uma **corrente elétrica I** (Fig. 8(b)).

Tal corrente é descrita pela equação 6 e vem da derivação da **Equação de Shockley**, do diodo ideal.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

onde I_L representa a corrente gerada pela incidência luminosa (fotogerada), I_0 corrente de saturação reversa do diodo e n o fator de idealidade do diodo (adimensional entre 1 e 2) obtido por ajuste de dados experimentais, k constante de Boltzmann e T a temperatura absoluta (K).

Quando a célula não é iluminada, I_L é nula e, então a equação 6 fica igual a de um diodo.

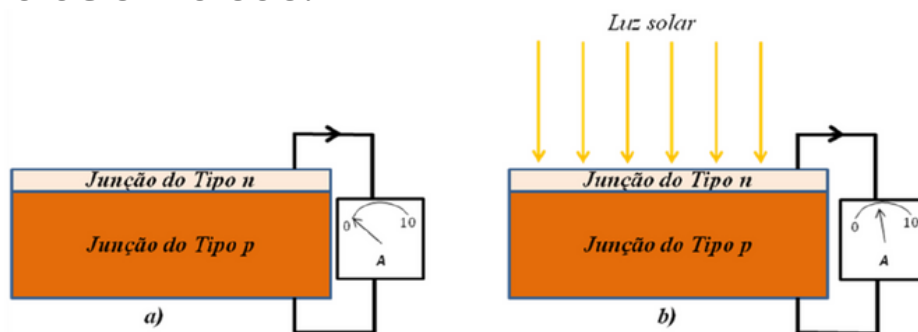


Figura 8 - Representação esquemática da Junção pn: (a) sem a incidência da luz, e (b) com a incidência da luz solar e consequentemente o surgimento da corrente elétrica indicada no amperímetro A.

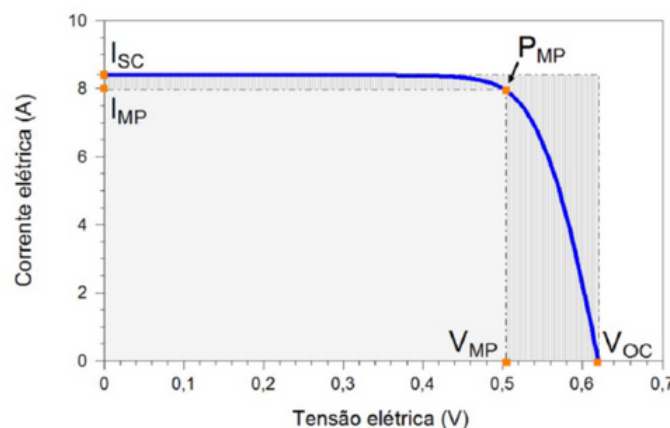


Figura 9 - Representação corrente elétrica em função do potencial elétrico em uma célula fotovoltaica. ISC corresponde a corrente elétrica de curto-circuito, VOC a tensão de circuito aberto, PMP a potência máxima e IMP e VMP são, respectivamente, a corrente e a tensão de potência máxima.

A eficiência (η) de uma célula solar é dada por um parâmetro que define o **quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica**, ou de uma forma quantitativa, a razão entre a potência produzida pela célula fotovoltaica e a potência da energia solar incidente na célula (Eq. 7).

Assim, para as células solares presentes na Terra, as medições das curvas $I-V$ são feitas por meios de valores padrões, **sendo o espectro solar como AM1.5** (Figura 10) e **temperatura de 25°C**.

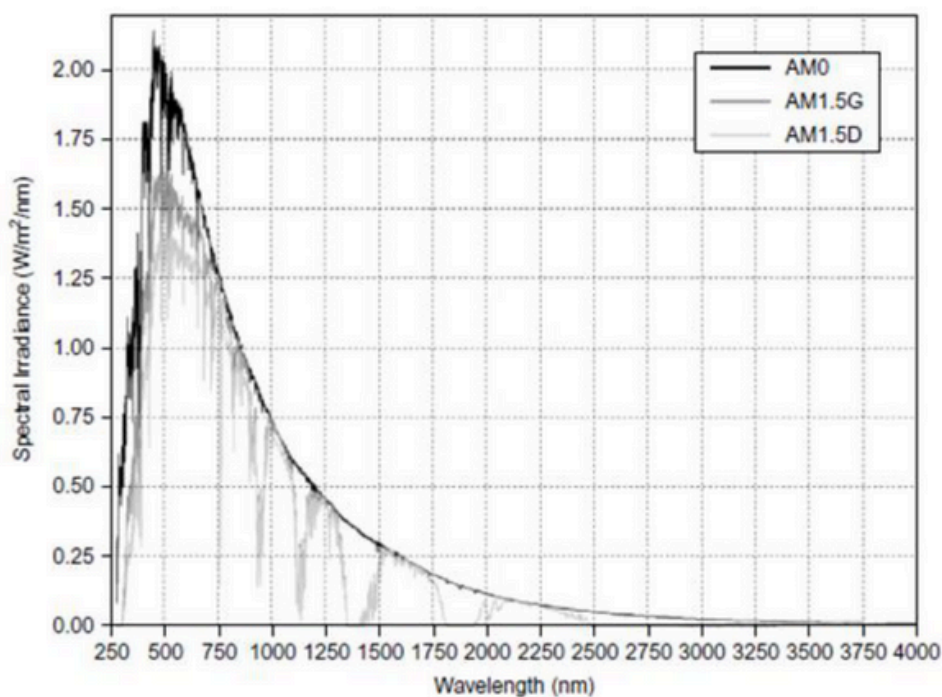


Figura 10 - Distribuição Espectral do Sol

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{A \cdot G} \cdot 100\% = \frac{P_{MP}}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (7)$$

sendo **A** a área (m²) da célula e **G** a irradiância (W/m²) solar incidente e **FF** a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto circuito com a tensão de circuito aberto.

FF - Fator de forma, calculado por:

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}}$$

Em um cenário global de crescente demanda por energia e preocupações ambientais, a **energia fotovoltaica não pode ser subestimada**, uma vez que ela desempenha um papel crucial na transição para uma matriz energética mais sustentável e resiliente.

Nos últimos tempos os avanços tecnológicos têm impulsionado em **escala mundial a adoção por essa forma de energia**, principalmente pelo fato de proporcionar independência energia a indivíduos, comunidades e países inteiros.



Portanto a adoção pela **energia fotovoltaica** implica em investir em um **futuro mais limpo, versátil e sustentável**, reforçando seu papel como pilar fundamental de uma economia verde.

REFERÊNCIAS

[1] O. Lucon, e J. Goldemberg, **“Energias renováveis: um futuro sustentável,”** Rev. USP, vol. 72, pp. 6-15, 2007. [Online] Available: <http://www.periodicos.usp.br/revusp/article/viewFile/13564/15382>.

REFERÊNCIAS

- [2] C. Breyer, et al., **“Solar photovoltaics demand for the global energy transition in the power sector,”** Prog. Photovoltaics Res. Appl., vol. 26, no. 8, pp. 505-523, 2018.
- [3] R. Ruther, **“Edifícios Solares Fotovoltaicos,”** 2004.
- [4] A. Firmino, M., Sousa, **“Energia Solar,”** 2015, [Online]. Available: <http://www.periodicos.usp.br/revusp/article/viewFile/13564/15382>.
- [5] M. J. G. Ferreira, **“Inserção da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil.”** 1993.
- [6] A. K. Kaushika, N. D., Kishra, A., Rai, **Solar Photovoltaics**, vol. 194. 2018.
- [7] F. Carlesso e L. E. Vieira, **“A irradiância solar: conceitos básicos,”** vol. 40, 2018.
- [8] L. Isabel e P. De Gomes, **“Células Solares Semi-transparentes de Silício Amorfo Micro/Nanocristalino,”** 2009.
- [9] D. M. Chapin, C. S. Fuller, e G. L. Pearson, **“A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power,”** J. Appl. Phys., vol. 25, no. 5, pp. 676-677, 1954.
- [10] T. D. Lee, e A. U. Ebong, **“A review of thin film solar cell technologies and challenges,”** Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 70, pp. 1286-1297, 2017.
- [11] R. B. Heideier, **“Metodologia para avaliar o emprego de técnicas de seleção e conversão da radiação solar sobre a produção de energia elétrica de células fotovoltaicas,”** Universidade de São Paulo, 2017

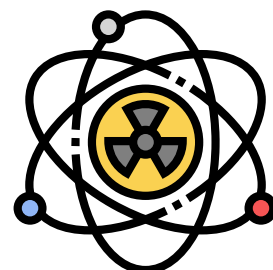
REFERÊNCIAS

- [12] K. T. Butler, J. M. Frost, e A. Walsh, **“Ferroelectric materials for solar energy conversion: Photoferroics revisited,”** Energy Environ. Sci., vol. 8, no. 3, pp. 838-848, 2015.
- [13] S. T.S, e K. C.R, **“New Materials for Thin Film Solar Cells,”** Coatings Thin-Film Technol., 2019.
- [14] K. L. Chopra, P. D. Paulson, e V. Dutta, **“Thin-film solar cells: an overview,”** Prog. Photovoltaics Res. Appl., vol. 12, no. 23, pp. 69-92, 2004.
- [15] P. A. Tipler, G. Mosca, **Física para Engenheiros e Cientistas**, Vol. 3, LTC, 2006.
- [16] E. A. C. Astrath, **“Princípios de uma Usina Fotovoltaica: uma aplicação ao ensino médio,”** Universidade Estadual de Maringá, 2015.
- [17] O. M. Morales, **“Construção e caracterização de células solares de filmes finos de CdS e CdTe,”** Universidade Estadual Paulista, 2012.
- [18] S. A. R. Cabral, **“Efeito Fotoelétrico: Uma Abordagem a Partir Do Estudo De Circuitos elétricos,”** Universidade Federal de Lavras, 2015.
- [19] M. A. Pinho, e J. T., Galdino, **“Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos,”** 2014.
- [20] M. P. Paranthaman, W. Wong-Ng, e R. N. Bhattacharya, **Semiconductor materials for solar photovoltaic cells.** 2015.

e. Energia Nuclear

(Gustavo Sanguino Dias)

A **energia nuclear** pode ser descrita, de forma simples, como a **obtenção de energia elétrica** a partir de processos físicos que ocorrem no **núcleo de átomos**.



A produção de energia elétrica a partir do núcleo de átomos pode ocorrer de três formas: **fissão nuclear**, **decaimento radioativo** e **fusão nuclear**.

Os processos de **fusão nuclear** e a **exploração do decaimento radioativo** ainda se encontram em processo de pesquisa e desenvolvimento para a aplicação civil.



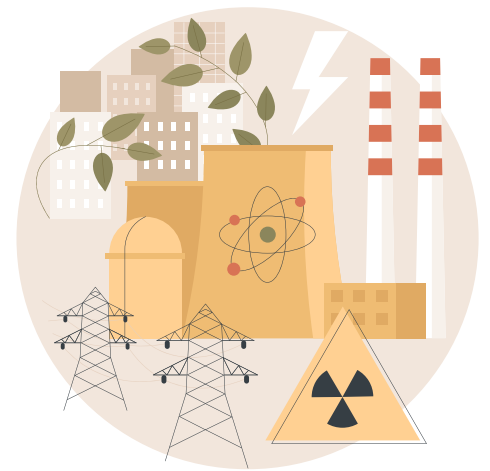
O processo de **fissão nuclear** é o mais difundido e consolidado mundialmente e trata-se do processo explorado nas **usinas nucleares** e, conseqüentemente, o de nosso interesse neste pequeno tópico e nos ateremos a ele.

A utilização de processos nucleares para a produção de energia representa atualmente cerca de **10% de toda a energia elétrica produzida no mundo** [1] a qual é produzida por 415 reatores nucleares em operação segundo a Agência Internacional de Energia Atômica - IAEA (do inglês "*International Atomic Energy Agency*") [2].

Estes 415 reatores são capazes de produzir uma potência líquida de 373.735 Megawatt elétrico (MWe). Além destes reatores atualmente em operação, outras 64 unidades se encontram em construção, os quais irão aumentar em 67.391 MWe a produção de energia nuclear mundial.

Do potencial instalado **cerca de 24,5% encontram-se instalado nos Estados Unidos da América**, sendo o maior produtor de energia nuclear do mundo, seguido pela França, 15,5%, e China, 13,7%. Do potencial energético atualmente em construção, 67.391 MWe, 47,8% estão sendo instalados na China, seguida pela Índia com 8% [2].

Por se tratar de uma fonte de energia com **alta densidade de energia, baixa emissão de carbono** associada e com **alta confiabilidade e regularidade**, ao contrário de muitas fontes de energia renováveis como fotovoltaica, que está sujeita a incidência do sol, eólica que está condicionada ao regime de ventos, ou mesmo hidráulica, que está regida pelos regimes de chuva, **são amplamente exploradas e desempenham grande papel no fornecimento de energia ao redor do mundo.**



Uma breve história da Energia Nuclear

A utilização da energia nuclear pelo homem remonta à descoberta das radiações ionizantes, a qual se deve ao físico e engenheiro alemão **Wilhelm Röntgen** que em 1895 ao estudar os tubos de **raios catódicos**¹ acabou por descobrir os raios X.

¹Tubos de raios catódicos: trata-se de um tubo mantido em vácuo dentro do qual um ou mais canhões de elétrons são responsáveis por emitir um feixe de elétrons que são direcionados para uma tela fosforescente. Os pontos sobre a tela sobre os quais o feixe de elétrons incidir, brilham e a união desses pontos brilhantes darão origem a uma imagem, tal como era observado em telas de televisores antigos.



Figura 1: Wilhelm Röntgen, físico e engenheiro alemão responsável pela descoberta dos raios X.



Figura 2: Antoine-Henri Becquerel, físico francês responsável por estudos que conduziram à descoberta da radioatividade.

No ano seguinte, o físico francês **Antonie-Henri Becquerel** ao estudar a pechblenda (minério contendo rádio e urânio) verificou que este minério era capaz de sensibilizar (escurecer) filmes fotográficos. Becquerel demonstrou que a **sensibilização dos filmes fotográficos** se devia à emissão de **partículas beta** (elétrons) e **partículas alfa** (núcleos de hélio) pela pechblenda.

No mesmo ano de 1896, **Pierre e Marie Currie** dão a este processo espontâneo de emissão de partículas e ondas eletromagnéticas pelo núcleo de alguns átomos de **“Radioatividade”**. Poucos anos depois, em 1902, **Ernest Rutherford** foi capaz de demonstrar que a **emissão espontânea** de partículas alfa e partículas beta a partir do núcleo de alguns átomos dava **origem a átomos diferentes**.

A emissão de partículas beta pelo núcleo de átomos de **Césio-137**², por exemplo, tem como resultado a **transformação do átomo de Césio-137 em um átomo de Bário-137**.

² O Césio-137 é um dos isótopos conhecidos do átomo de Césio. Isto é, existem 32 configurações diferentes para o núcleo do átomo de Césio, todas elas com 55 prótons no núcleo e diferente número de nêutrons. O número 137, no exemplo dado, é conhecido como número de massa e representa o total de partículas presente no núcleo do átomo de Césio-137, isto é, a soma do número de prótons com o número de nêutrons (55 prótons e 82 nêutrons).

Em 1932 dois eventos importantes marcaram a evolução da compreensão humana sobre a **estrutura da matéria** e a utilização da **radioatividade**.

Neste ano o físico britânico **James Chadwick** provou a existência dos nêutrons e os físicos **John Cockcroft e Ernest Walton** demonstraram a **possibilidade da transmutação de núcleos atômicos** por meio do bombardeamento destes núcleos com prótons acelerados artificialmente por meio de aceleradores de partículas.



Verificou-se posteriormente, em 1934, por **Irene Curie** e **Frederic Joliot**, que alguns destes átomos resultantes das transmutações nucleares eram **radioativos**, constando-se assim a possibilidade de **síntese artificial de átomos radioativos**.

No ano seguinte, o físico italiano **Enrico Fermi**, constatou que ao **utilizar nêutrons no lugar de prótons**, uma variedade muito maior de átomos radioativos poderia ser produzida artificialmente.

Fermi continuou seus trabalhos produzindo **átomos radioativos a partir do bombardeamento de átomos leves**. Na maior parte dos estudos conduzidos Fermi **obtinha átomos mais pesados que os átomos alvo**.

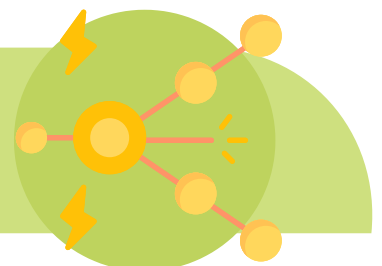
Contudo, ao bombardear átomos de urânio, os quais são mais pesados, com nêutrons **Fermi** foi capaz de produzir átomos mais leves.



Figura 3: Otto Frisch, físico nuclear alemão que, juntamente com Lise Meitner, foi responsável pela explicação teórica do processo de fissão nuclear.

Finalmente, em dezembro de 1938 **Otto Hahn** e **Fritz Strassmann**, em Berlim, ao conduzirem experimentos com urânio, demonstraram que os átomos leves produzidos por Fermi se tratava de **átomos de Bário** e outros elementos com cerca de metade da massa do urânio.

Com esta constatação experimental eles foram capazes de demonstrar o processo de **fissão nuclear**.




Neste mesmo ano **Lise Meitner** e **Otto Frisch**, trabalhando sob a supervisão de **Niels Bohr**, foram capazes de **explicar o processo de fissão** ao sugerir que o nêutron era capturado pelo núcleo do átomo de urânio.



Figura 4 : Fritz Strassmann, Lise Meitner e Otto Hahn, principais responsáveis pela descoberta do processo de fissão nuclear.

Ao capturar o nêutron o átomo de urânio passa por intensas **vibrações do núcleo** que conduzem a **divisão do núcleo em duas partes não iguais**.



Ao explicar o processo de fissão nuclear, **Otto Frisch** calculou que uma **grande quantidade de energia era liberada neste processo**, previsão esta confirmada experimentalmente já em janeiro de 1939.

³ A equivalência entre massa e energia foi proposta por Einstein em 1905 e expressa por meio da famosa equação $E=mc^2$. Esta expressão basicamente afirma que se conseguíssemos converter toda a massa m , de uma substância qualquer, em energia, ela seria igual ao produto da massa vezes o quadrado da velocidade da luz, representada pela letra c . Para ilustrar em números a enorme quantidade de energia que esta conversão representa, consideremos 1g de qualquer substância, esta quantidade de massa seria suficiente para manter um chuveiro funcionando na posição verão (7800 Watts) por aproximadamente 365 anos, ou permitir que cerca de 1.315.000 pessoas tomassem banho, ao mesmo tempo, durante 1 hora.

Esta foi a primeira confirmação experimental da **equivalência entre massa e energia**³ proposta por **Albert Einstein** em 1905. A descoberta do **processo de fissão nuclear** em 1938 deu o pontapé inicial para o estudo e desenvolvimento tecnológico para a **coleta de energia**, sendo seguida por inúmeros desenvolvimentos e o início de diferentes frentes de pesquisa.

Dando continuidade aos estudos sobre a **fissão nuclear**, Hahn e Strassmann, em 1939, demonstraram que a fissão nuclear de um átomo de urânio além de liberar uma grande quantidade de energia, também resultava na **liberação de mais nêutrons**.



Estes nêutrons, por sua vez, poderiam causar a **fissão de outros átomos de urânio** e, possivelmente, desencadear uma **reação em cadeia autossustentada** resultando em uma **enorme liberação de energia**.

Esta possibilidade foi rapidamente confirmada experimentalmente por **Frederic Joliot** e seus colaboradores em Paris, França, e por **Leo Szilard** que trabalhava com **Enrico Fermi** em Nova York, EUA.

Ainda em 1939, **Niels Bohr** propôs que a fissão nuclear seria muito mais provável de ocorrer utilizando o **isótopo urânio-235** do que no U-238, além disso que o **processo de fissão nuclear** seria mais facilmente atingido se fossem utilizados **nêutrons mais lentos do que os nêutrons rápidos** liberados no processo de fissão.

Esta última afirmação foi confirmada por **Leo Szilard** e **Enrico Fermi**, que propuseram a utilização de um **material “moderador” para reduzir a velocidade dos nêutrons** emitidos durante a fissão nuclear e assim aumentar a probabilidade destes nêutrons desencadarem **novos processos de fissão nuclear**.



Niels Bohr e **John Archibald Wheeler** estenderam essas ideias dando origem ao que se tornou uma **análise clássica do processo de fissão**, que resultou em um artigo [3] publicado apenas dois dias antes do início da 2ª guerra mundial em 1939.

Outro fato importante, e já conhecido à época, está relacionado à **disponibilidade de Urânio-235 na natureza**. O urânio é encontrado naturalmente espalhado pela crosta terrestre, contudo **apenas 0,72% de todo o urânio disponível é de Urânio-235, enquanto 99,2% do Urânio, é encontrado na forma de Urânio-238.**



Assim, para a **utilização do Urânio-235** como combustível para fissão nuclear se faria necessário a **separação desses dois isótopos**, o que não seria uma tarefa fácil, tanto à época do desenvolvimento da bomba atômica e também nos dias atuais, pois ambos apresentam o mesmo comportamento químico com pequenas diferenças em suas características físicas.

Esse processo de aumento da concentração de Urânio-235 ficou conhecido como “enriquecimento”.

A parte restante do **conceito de fissão para a bomba atômica** foi fornecida em 1939 por **Francis Perrin**, que introduziu o conceito da **massa crítica de urânio**, a qual seria a massa mínima necessária de material físsil, no caso Urânio-235, para produzir uma **liberação autossustentável de energia** sem a necessidade de inserção de nêutrons ao sistema.

Suas teorias foram estendidas por **Rudolf Peierls** na Universidade de Birmingham e os cálculos resultantes foram de considerável importância no **desenvolvimento da bomba atômica**.

O grupo de Perrin em Paris continuou seus estudos e demonstrou que uma **reação em cadeia** poderia ser sustentada caso fosse utilizada uma **mistura de urânio-água**, com a água sendo usada para **desacelerar os nêutrons**.

Eles também demonstraram a ideia de introduzir um **material absorvente de nêutrons para limitar a multiplicação de nêutrons** e, assim, controlar a reação nuclear, sendo este o princípio base de operação e controle de uma **usina nuclear**.

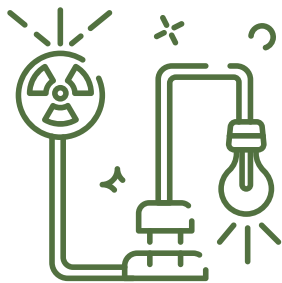
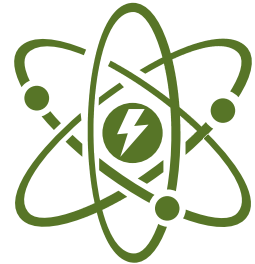


No curso do desenvolvimento de armas nucleares, a União Soviética e o Ocidente adquiriram uma gama de novas tecnologias e os cientistas perceberam que o **tremendo calor produzido no processo poderia ser aproveitado para uso direto ou para gerar eletricidade.**

Também estava claro que essa nova forma de energia permitiria o **desenvolvimento de fontes de energia compactas e duradouras** que poderiam ter várias aplicações não menos importante, como para o transporte marítimo e, especialmente, em submarinos.

Finalmente, em dezembro de 1951, após anos de estudo e desenvolvimento o **primeiro reator nuclear foi inicializado**. Este **primeiro reator nuclear a produzir eletricidade**, embora em uma quantidade muito pequena, foi o pequeno reator *Experimental Breeder* (EBR- 1), projetado e operado pelo *Argonne National Laboratory* e localizado em Idaho, EUA.

Na União Soviética, o trabalho estava em andamento em vários centros para aprimorar os projetos de reatores existentes e desenvolver novos. O Instituto de Física e Engenharia de Energia (FEI) foi criado em maio de 1946 na então fechada cidade de Obninsk, 100 km a sudoeste de Moscou, **para desenvolver tecnologias a serem aplicadas na produção de energia nuclear.**



O **reator de produção de plutônio** do tipo canal moderado por grafite, desenvolvido inicialmente para a produção de combustível para bombas nucleares, foi modificado para **geração de calor e eletricidade** e, em junho de 1954, o primeiro gerador de eletricidade movido a energia nuclear do mundo começou a operar no FEI em Obninsk.

O reator AM-1 (Atom Mirny – átomo pacífico) era **resfriado a água e moderado por grafite**, com uma capacidade de projeto de 30 Megawatt térmico ou 5 Megawatt elétrico.

Este reator era semelhante em princípio aos reatores de produção de plutônio, utilizado no projeto de bombas atômicas, nas cidades militares fechadas da extinta URSS e serviu como um **protótipo para outros projetos de reatores de canal de grafite**, incluindo os reatores RBMK do tipo Chernobyl (Reaktor Bolshoi Moshchnosty Kanalny – reator de canal de alta potência).

O AM-1 produziu eletricidade até 1959 e foi usado até 2000 como uma instalação de pesquisa e para a produção de isótopos.

Mas como funciona um Reator Nuclear?

Os **reatores nucleares** funcionam de forma análoga a uma **usina termoeletrica**, nesta última um combustível fóssil (gás, carvão, etc) é queimado para elevar a temperatura da água, para produzir vapor em alta pressão, o qual é utilizado para movimentar as pás de uma turbina que será responsável por converter a energia de **movimento de suas turbinas em energia elétrica**.

O diferencial da **usina nuclear** é a utilização da **grande quantidade de energia liberada durante o processo de fissão nuclear para realizar o aquecimento da água**.



Os **reatores nucleares** utilizados em **usinas nucleares** e, eventualmente, na propulsão de alguns submarinos e navios tem como base o **processo de fissão nuclear**. Este processo, como vimos anteriormente, é caracterizado pela **divisão do núcleo de um átomo radioativo em dois ou mais átomos menores**, também chamados de **átomos filhos**.

Para ilustrar o **processo de fissão nuclear** podemos utilizar o caso do átomo de urânio como exemplo, **Figura 6**. Na **fissão do Urânio**, um átomo de urânio ao absorver um nêutron tem seu núcleo fissionado dando origem à dois átomos menores, um átomo de **Bário-141** e um átomo de **Criptônio-92**, ambos radioativos.

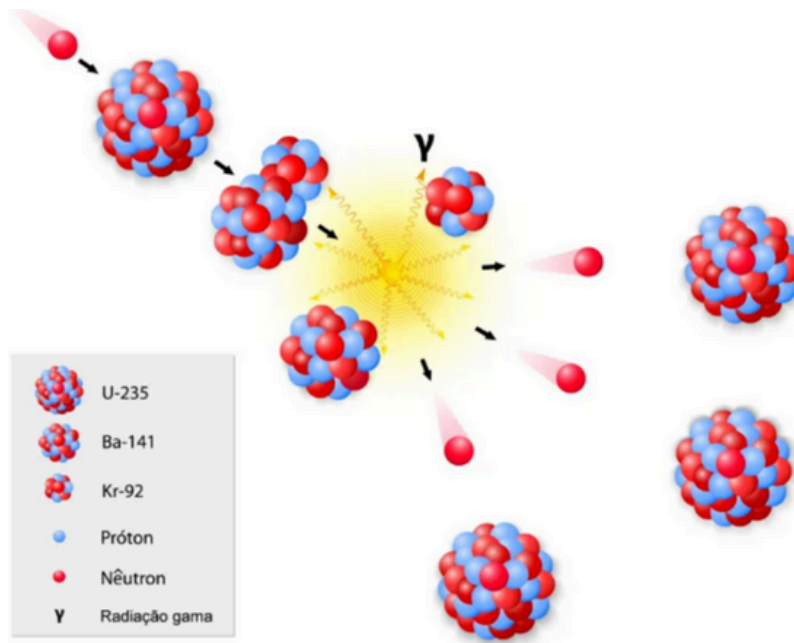
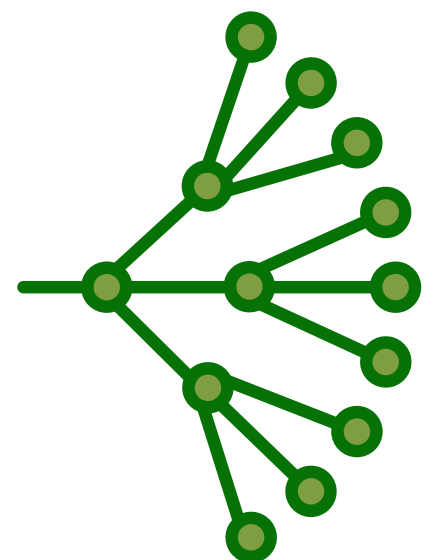


Figura 6: Processo de reação em cadeia do Urânio-235 desencadeado pela captura de um átomo de urânio.

Vale observar que este é apenas um dos vários resultados possíveis da fissão do Urânio-235. Além dos átomos filhos produzidos no processo de fissão, também são **liberados 3 nêutrons com alta energia** (grande velocidade) e **vários fótons de radiação gama**.

Como em cada processo de fissão obtém-se como resultado a **produção de 3 novos nêutrons**, o processo de fissão pode dar início a uma **reação em cadeia**, onde cada um dos **3 nêutrons liberados pode induzir a fissão de um novo átomo de Urânio e cada novo átomo de Urânio irá liberar até 3 novos nêutrons, resultando agora em 9 nêutrons**, cada um deles sendo capaz de induzir a fissão de um novo átomo, resultando assim em uma reação em cadeia.



Em **reatores nucleares** o combustível básico utilizado é o **Urânio-235**. Usualmente, cilindros de óxido de urânio (UO₂) são confeccionados no formato de cilindros com 1 cm de diâmetro por 1,5 cm de comprimento e são usualmente dispostos no interior de um longo tubo de Zircônio, tal como ilustrado na **Figura 5**, o qual é resistente à corrosão e transparente aos nêutrons.

Nos reatores mais comuns, esses tubos de Zircônio têm cerca de 4 metros de comprimento e são dispostos na forma de uma rede aberta que pode ser inserida ou retirada de dentro do reator [4].

Para que o **processo de fissão nuclear** ocorra de forma eficiente, se faz necessários que os **nêutrons emitidos durante a fissão nuclear sejam desacelerados** para aumentar a probabilidade de que estes nêutrons sejam absorvidos e desencadeiem novos processos de fissão nuclear.

A **desaceleração dos nêutrons** no núcleo do reator é realizada pelo **material moderador**, onde usualmente utiliza-se a água para desempenhar este papel e, em alguns casos, se utiliza a **água pesada**.⁴

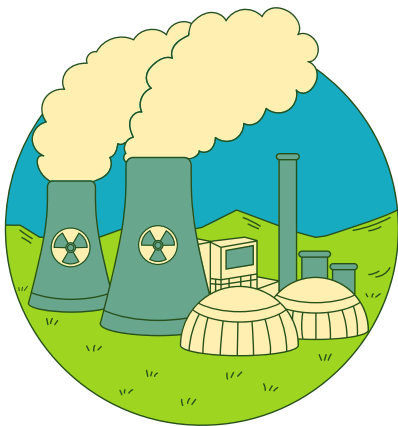
⁴. A água pesada, também chamada de água deuterada, trata-se do óxido de deutério, de fórmula química D₂O ou 2H²O. A água deuterada é quimicamente muito semelhante à água, contudo ela é composta por dois átomos de deutério no lugar de dois átomos de hidrogênio. O deutério por sua vez, é um isótopo do hidrogênio, ou seja, trata-se de um átomo de hidrogênio com um próton e um nêutron no núcleo, quando o átomo de hidrogênio apresenta esta configuração especial, ele é denominado Deutério.

Além do material moderador, para que o processo de **fissão nuclear** ocorra de forma controlada, faz-se uso das **barras ou lâminas de controle**.

Estes elementos são fabricados a partir de **materiais absorvedores de nêutrons** (como Cádmiio, Háfniio e Boro) e, conseqüentemente, tem o papel de **controlar a taxa de fissão nuclear** ou mesmo de **interrompê-la**.

Durante a operação do reator nuclear as **barras de controle são inseridas dentro do reator**, entre as barras de combustível, para modular a quantidade de **fissões nucleares** que ocorrerão simultaneamente e, conseqüentemente, **ajustar a quantidade de energia liberada e produzida pelo reator**.

Este controle impede que o reator sofra um sobreaquecimento e também possibilita cessar a reação em cadeia.



Este último procedimento é utilizado para **desligar a usina nuclear**, procedimento que ocorre tanto para a realização do **reabastecimento da usina nuclear**, que usualmente ocorre em intervalos de 12, 18 ou 24 meses, quando o combustível nuclear é exaurido, quanto para o **desligamento permanente de uma usina**.

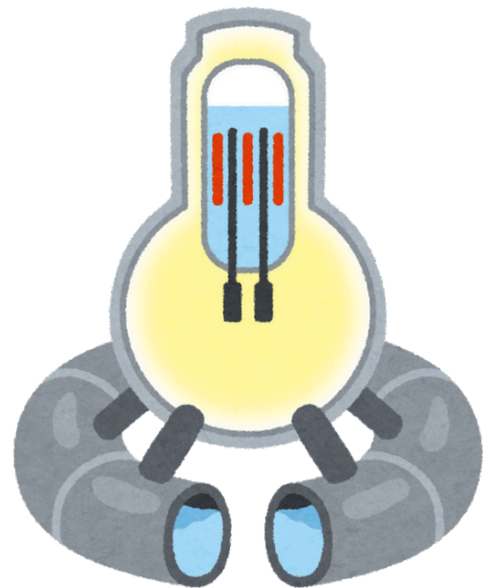
No processo de **fissão nuclear**, como vimos anteriormente, o átomo de urânio é dividido em átomos menores e há a liberação de nêutrons, todas essas partículas são liberadas com alta velocidade durante a fissão, conseqüentemente, **transportam grande quantidade de energia**.

A energia de movimento das partículas liberadas representam **cerca de 85% de toda a energia liberada no processo de fissão**, esta energia de movimento é a energia utilizada para a **produção de energia elétrica**.

Esses átomos e partículas irão **colidir com os átomos dos materiais que compõem o reator nuclear**, transformando essa energia de **movimento das partículas em calor**.

Este calor é utilizado para a **produção de vapor** que será utilizado para **movimentar as turbinas do gerador que converterá o movimento de suas pás em energia elétrica**.

Dentro do reator as **barras de elemento combustível ficam imersas em água**, a qual desempenhará o papel de **refrigerar o reator**, para evitar o sobreaquecimento do combustível nuclear e para **coletar a energia produzida por ele**, e também de **moderador**, pois como vimos anteriormente o processo de fissão se torna mais eficiente se reduzirmos a velocidade dos nêutrons.



Tipos de Reatores Nucleares

Os **reatores nucleares** desde o início de seu desenvolvimento foram desenvolvidos em diferentes configurações, visando a **segurança e eficiência energética**.

Para ilustrar alguns dos **tipos de reatores** desenvolvidos podemos citar os **reatores de água leve**, os quais podem ser encontrados em duas configurações, que podem ser observadas nas Figuras 7 e 8.

Os dois arranjos se diferenciam principalmente pelo seu **circuito de resfriamento e produção de vapor**. Nos reatores de água pressurizadas ("Pressurized Water Reactor" – PWR) utilizam-se no mínimo **três circuitos de circulação de água**.

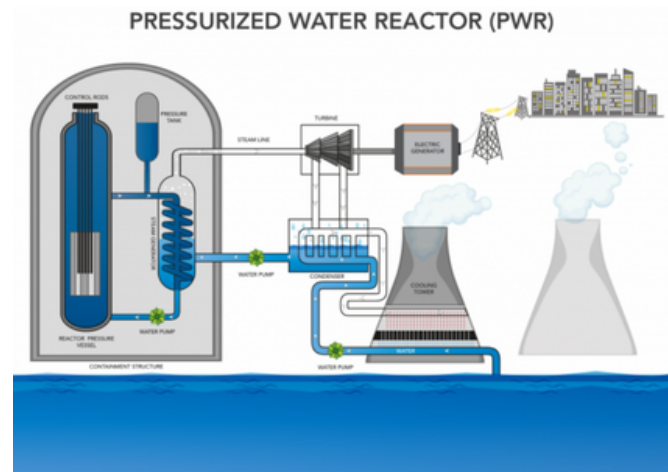
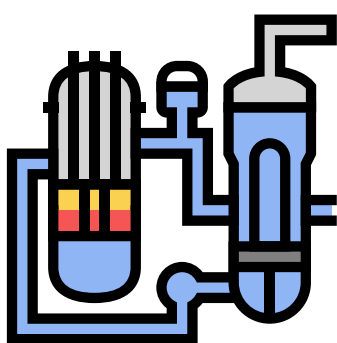


Figura 7: Exemplo esquemático de um Reator de água pressurizada PWR [4]

No primeiro circuito de água, esta é bombeada para dentro do reator sob alta pressão, sendo esta necessária para evitar que a **água entre em ebulição**.

Ao passar pelo reator, a **água pressurizada é aquecida e bombeada para o interior de tubos trocadores de calor** que irão transferir o calor da água pressurizada do primeiro circuito para a água contida em um segundo circuito.



O calor recebido pela água do segundo circuito é **suficiente para evaporar a água e produzir vapor**, o qual é utilizado para movimentar as turbinas da usina que por sua vez irão movimentar o gerador que irá **converter o seu movimento em energia elétrica**.

Após passar pela turbina o vapor de água irá passar por um **sistema de refrigeração** que irá condensar o vapor e transformá-lo novamente em água, a qual será bombeada novamente para o trocador de calor para ser **convertida novamente em vapor e assim o ciclo se reinicia**.

O sistema de refrigeração utilizado para condensar o vapor do sistema secundário de água é usualmente refrigerado por um terceiro circuito de água que usualmente **utiliza uma fonte externa de água**, como um lago, rio ou mesmo água do mar, para realizar a troca de calor.

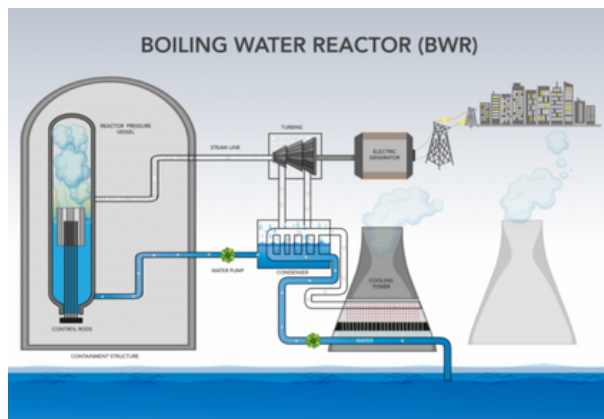


Figura 8: Exemplo esquemático de um Reator de água fervente BWR .

O segundo principal tipo de reator nuclear é o **Reator de água fervente** (“*Boiling Water Reactor*” – BWR). Neste tipo de reator encontramos no mínimo **dois circuitos de água responsáveis pelo funcionamento da usina**.

Nestes reatores o **vapor de água é produzido diretamente dentro do reator**, como podemos observar na Figura 8. Este vapor, em alta pressão, é conduzido por tubulações até a turbina da usina provocando o seu movimento, que por sua vez será **convertido em energia elétrica pelo gerador**.

Após passar pela turbina o **vapor passa por um sistema de condensação** onde é transformado novamente em água a qual é bombeada novamente para dentro do reator, e o ciclo reinicia.

O **sistema de condensação**, assim como nos reatores PWR, são refrigerados por um circuito de água que se vale, usualmente, da água de grandes lagos, rios ou mesmo do mar, para realizar a troca de calor [6] [7].

O futuro dos reatores nucleares

Com a finalidade de sistematizar a **evolução dos reatores nucleares** desenvolvidos ou em desenvolvimento, estes são agrupados em **gerações**.

Os reatores classificados como de **Geração I** trata-se dos **primeiros protótipos de reatores nucleares**, bem como aqueles que deram início à utilização da **energia nuclear civil**.

Estes reatores encontram-se hoje todos aposentados, isto é, não operam mais comercialmente, sendo o último deles desligado em 2015 no Reino Unido. Os reatores de **Geração II e III** são os que se **encontram atualmente em operação ao redor do mundo**.



Os **reatores de Geração II** foram desenvolvidos e construídos principalmente nas décadas de 1960 e 1970, sendo desenvolvidos para a produção de energia elétrica de forma **eficiente e segura**. Estes foram projetados para ter uma vida útil de até 40 anos.

Os **reatores de Geração II** foram desenvolvidos e construídos principalmente nas décadas de 1960 e 1970, sendo desenvolvidos para a produção de energia elétrica de forma **eficiente e segura**.

Nesta geração de reatores encontram-se os **reatores de água pressurizada** (PWR) e **reatores de água fervente** (BWR), descritos anteriormente, reatores do tipo CANDU (*"Canadian Deuterium Uranium"*) que são reatores de água pesada pressurizada (*"Pressurized Heavy-Water Reactor"*), reatores avançados refrigerados a gás AGR (*"Advanced Gas-cooled Reactor"*), e reatores Vodo-Vodyanoi Energetichesky (VVER) de tecnologia da extinta União das Repúblicas Socialistas Soviéticas.

Os sistemas de **Geração II** começam a operar no final da década de 1960 e compreendem a **maior parte dos mais de 400 reatores PWR e BWR comerciais em operação no mundo.**

Os **reatores nucleares de Geração III** são essencialmente reatores de Geração II com **melhorias de última geração.** Essas melhorias estão nas áreas de **tecnologia de combustível, eficiência térmica, construção modularizada, sistemas de segurança**

(especialmente o uso de sistemas passivos⁵ em vez de ativos) e projetos padronizados destinados a reduzir os custos de manutenção e de capital.

⁵. Os sistemas tradicionais de segurança dos reatores são “ativos” no sentido em que envolvem operação elétrica ou mecânica sob comando. Alguns sistemas projetados operam passivamente, como, por exemplo, válvulas de alívio de pressão. Estes sistemas funcionam sem controle do operador e apesar de qualquer perda de energia auxiliar. Ambos exigem sistemas redundantes paralelos. A segurança passiva inerente ou total depende apenas de fenômenos físicos como convecção, gravidade ou resistência a altas temperaturas e não do funcionamento de componentes projetados.

Melhorias na tecnologia de reatores de **Geração III** visam uma **vida operacional mais longa**, normalmente 60 anos de operação, potencialmente excedendo em muito os 60 anos, antes da revisão completa e substituição do vaso de pressão do reator.

O **PWR avançado Westinghouse 600 MW (AP-600)** foi um dos primeiros projetos de reator de Geração III. Em paralelo, a GE Nuclear Energy projetou o Reator avançado de água fervente – ABWR (do inglês “*Advanced Boiling Water Reactor*”).

A primeira dessas unidades entrou em operação no Japão em 1996. Outros projetos de reator de Geração III incluem o Enhanced CANDU 6, que foi desenvolvido pela Atomic Energy of Canada Limited (AECL) e o System 80+, um projeto de Engenharia de Combustão.

O maior diferencial da maioria dos projetos atualmente em operação, os quais englobam **reatores de Geração III e III+**, é que muitos incorporam recursos de segurança passivos ou inerentes que não exigem controles ativos ou intervenção operacional para evitar acidentes em caso de mau funcionamento.

Eles podem se valer da gravidade, convecção natural ou resistência a altas temperaturas, **resultando assim em níveis maiores de segurança.**

Os reatores de **Geração III+** incorporam **recursos extras de segurança** para evitar o tipo de desastre sofrido em Fukushima em 2011. Os **projetos de Geração III+ de segurança passiva**, também conhecida como **resfriamento passivo**, não exigem nenhuma ação sustentada do operador ou feedback eletrônico para desligar a usina com segurança em caso de emergência.

Muitos dos reatores nucleares de **Geração III+** têm um coletor de núcleo, isto é, se o revestimento do combustível, os sistemas de vasos do reator e a tubulação derreterem, o núcleo do reator cairá em um coletor de núcleo que retém o material derretido e irá resfriá-lo. Isso, por sua vez, protege a barreira final, isto é, o edifício de contenção.

Como exemplo, a Rosatom instalou um **coletor de núcleo** de 200 toneladas no reator VVER como o primeiro grande equipamento no edifício do reator de Rooppur 1, descrevendo-o como "**um sistema de proteção exclusivo**" [8].

Em 2017, a Rosatom iniciou as operações comerciais do reator NVNPP-2 Unidade 1 VVER-1200 na Rússia central, marcando a **primeira inicialização completa do mundo de um reator de geração III+** [9].

Fornecedores de reatores nucleares na América do Norte, Japão, Europa, Rússia, China e outros lugares têm uma **dúzia de novos projetos de reatores nucleares em estágios avançados de planejamento ou em construção**, enquanto outros estão em estágio de pesquisa e desenvolvimento.

Os **reatores de Geração IV** se encontram na fase de pesquisa e desenvolvimento ou como prova de conceito. Os **reatores nucleares de Geração IV** estão sendo desenvolvidos por meio de uma **cooperação internacional de 14 países** [6].

Dentre os projetos em desenvolvimento de **Geração IV** podemos citar o **Reator Nuclear Rápido Refrigerado por Sódio** ("Sodium-Cooled Fast Reactor" – SFR) o qual utiliza um metal líquido (Sódio) como refrigerante no lugar da água usualmente utilizada como líquido de resfriamento e como moderador

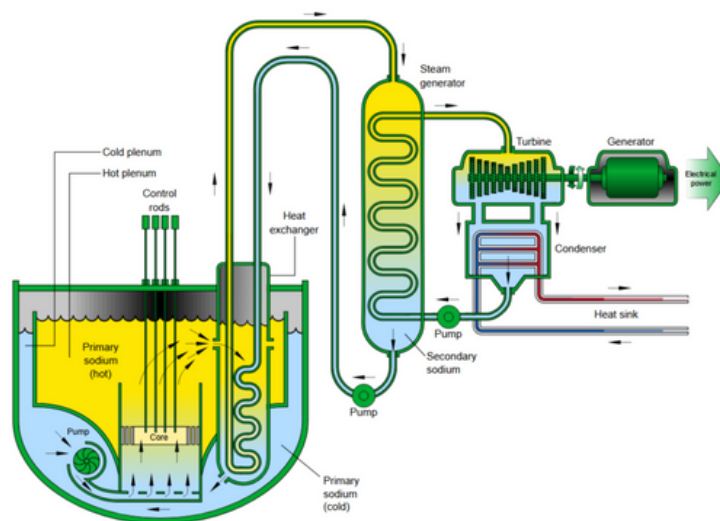
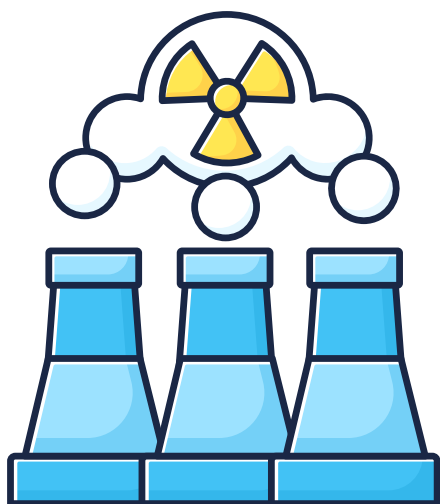


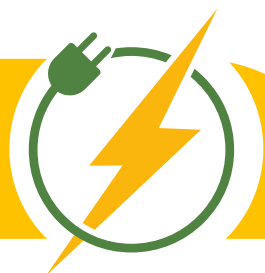
Figura 9: Reator de Energia Nuclear de Geração IV com tecnologia "Sodium-Cooled Fast Reactor"

A utilização de um **material metálico** permite que o **líquido refrigerante opere em temperaturas mais altas e pressões mais baixas** do que os reatores atuais, melhorando a eficiência e a segurança do sistema.



O SFR também utiliza um **espectro de nêutrons rápidos**, por isso denominado de **reator nuclear rápido**, o que significa que os nêutrons podem causar **fissão sem ter que ser desacelerados primeiro**, como acontece nos reatores atuais em que a água é utilizada como moderador.

Isso pode permitir que os reatores SFR usem material físsil e combustível gasto dos reatores atuais para produzir eletricidade.



Outro modelo de reator em pesquisa e desenvolvimento é o **Reator de Temperatura Muito Alta** (*"Very High Temperature Reactor"*). Este tipo de reator é **resfriado por um gás em circulação** e é projetado para **operar em altas temperaturas**, características estas que podem conduzir a uma produção de eletricidade de forma extremamente eficiente.

O **gás de alta temperatura** também pode ser usado em **processos intensivos em energia** que atualmente dependem de combustíveis fósseis, como produção de hidrogênio, dessalinização, aquecimento urbano, refino de petróleo e produção de amônia [6].

É importante também destacar uma classe de grande interesse que se encontra em desenvolvimento e que pode representar uma **grande evolução na utilização de energia nuclear** de forma comercial que são os reatores de pequeno porte.

Uma classe de reatores em desenvolvimento são os **Pequenos Reatores Modulares Avançados** (“*Advanced Small Modular Reactors*” – SMR). Esses reatores avançados, estão sendo projetados para variar em tamanho de **20 a 300 megawatts**, podendo ser utilizados para geração de energia, calor de processo, dessalinização ou outros usos industriais.

Os projetos de SMR podem **empregar água leve como refrigerante** ou outros refrigerantes de água não leve, como gás, metal líquido ou sal fundido.

Os SMRs avançados oferecem muitas vantagens, como a necessidade de **pequenas áreas para instalação, investimento de capital reduzido, capacidade de serem instalados em locais onde a instalação de usinas nucleares maiores não é viável** e a **possibilidade de aumento da capacidade instalada de energia, por serem modulares** [10]



Outra classe de reatores de pequeno porte de grande interesse comercial são os **Microrreatores Nucleares** que recebem esta nomenclatura por apresentarem **tamanhos da ordem de 100 a 1000 vezes menores que um reator convencional** (aproximadamente 1.000 Megawatts), com capacidades variando entre 1 e 20 Megawatts.

A proposta desses reatores é serem reatores *plug-and-play*, isto é, **prontos para serem conectados e utilizados**, podendo facilmente serem transportados por estradas, ferrovias ou ar.

Devido ao seu tamanho reduzido, eles **podem ser implantados em locais como comunidades isoladas**, comunidades afetadas por desastres naturais ou em indústrias como a de dessalinização ou mesmo na produção de hidrogênio. Ele pode tanto operar como **parte da rede de fornecimento** de energia elétrica ou de **forma independente da rede**.

Uma das principais **vantagens dos microrreatores** é que eles têm um **impacto ambiental menor do que os combustíveis fósseis** uma vez que não emitem gases de efeito estufa, como CO₂ e metano, ao contrário de geradores movidos à combustíveis fósseis, geralmente utilizados em contextos como áreas remotas, comunidades afetadas por desastres naturais etc.

Mas e o lixo produzido pelas usinas nucleares?

Como qualquer indústria, a indústria nuclear gera lixo. No entanto, diferentemente de muitas indústrias, a **energia nuclear gera muito pouco dele**, contudo ela é regida por **rigorosos procedimentos e regulações** que a induzem a conter e gerenciar totalmente o lixo que produz.



A grande maioria dos resíduos de usinas nucleares não é muito radioativa e, por muitas décadas, vem sendo **gerenciada e descartada de forma responsável**.

Para se ter uma ideia da quantidade de lixo produzida, se a energia nuclear fosse usada para suprir as necessidades de eletricidade de uma pessoa por um ano inteiro, **apenas cerca de 5 gramas de lixo altamente radioativo seriam produzidos**, o que é o mesmo peso de uma folha de papel [11]

O combustível usado que sai do reator pode ser gerenciado de **diferentes maneiras**, incluindo **reciclagem para produção de energia ou descarte direto**. Na verdade, muitos países têm usado **combustível reciclado por décadas para abastecer parcialmente seus reatores**.

REFERÊNCIAS

[1] W. N. Association, "**World Nuclear Association**," 02 05 2024. [Online]. Available: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy>. [Acesso em 31 07 2024].

[2] "**Power Reactor Information System**," [Online]. Available: <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>. [Acesso em 13 08 2024].

[3] B. Nels e J. A. Wheeler, "**The Mechanism of Nuclear Fission**," Physical Review, vol. 56, pp. 426-450, 1 09 1939.

[4] U. D. o. **Energy**. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work>. [Acesso em 22 09 2024].

REFERÊNCIAS

[5] W. N. Association, “**Nuclear Power Reactors,**” 27 08 2024. [Online]. Available: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors>. [Acesso em 01 09 2024].

[6] “**The ultimate fast facts guide to nuclear energy,**” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2019/01/f58/Ultimate%20Fast%20Facts%20Guide-PRINT.pdf>. [Acesso em 15 09 2024].

[7] Eletronuclear, “**Energia Nuclear,**” [Online]. Available: <https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/Energia-Nuclear.aspx>. [Acesso em 15 09 2024].

[8] W. N. News, “**Installation has begun of the core catcher - a passive safety system - for unit 1 of the Rooppur nuclear power plant in Bangladesh, Russian state nuclear corporation Rosatom announced,**” [Online]. Available: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Core-catcher-installation-under-way-at-Rooppur-1>. [Acesso em 15 09 2024].

[9] “**Russia completes world's first Gen III+ reactor; China to start up five reactors in 2017,**” [Online]. Available: <https://www.reutersevents.com/nuclear/russia-completes-worlds-first-gen-iii-reactor-china-start-five-reactors-2017>. [Acesso em 15 09 2024].

[10] U. D. o. Energy, “**Advanced Small Modular Reactors (SMRs),**” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs>. [Acesso em 15 09 2024].

[11] W. N. Association, “**Nuclear Essentials: How does a nuclear reactor works?,**” [Online]. Available: <https://world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-does-a-nuclear-reactor-work>. [Acesso em 15 09 2024].

f. Energia Geotérmica

(Eduardo Augusto Castelli Astrath e Ricardo Gouveia Teodoro)

O **crescimento populacional e econômico** tem impulsionado cada vez o aumento da demanda por energia global, que atualmente se aproxima de **80% da produção de energia primária dependente de combustíveis fósseis**. Isso implica um elevado grau de **emissões de gases de efeito estufa**, bem como, impactos ambientais negativos.



Na constante busca por soluções cada vez mais confiáveis e duradouras, a **energia geotérmica (GE)**, além de ser uma fonte renovável e com baixa emissão de carbono, apresenta um grande potencial para **mitigar a ameaça das alterações climáticas**.

Esse tipo de energia também tem a vantagem de **ocupar menos área terrestre em sua montagem estrutural**, quando comparada com a geração eólica e fotovoltaica, e de não depender de condições climáticas ou sazonais.

Isso ocorre, pois, a produção de energia geotérmica vem da utilização da manifestação direta do calor interno da Terra, fonte que existe há bilhões de anos e que continuará disponível por um período extremamente longo na escala humana.

Assim, o **calor capturado no subsolo por uma usina geotérmica** (Fig. 1), pode ser convertido em **eletricidade** ou pode ser utilizado desde aquecimento residenciais até operações industriais de grande escala.

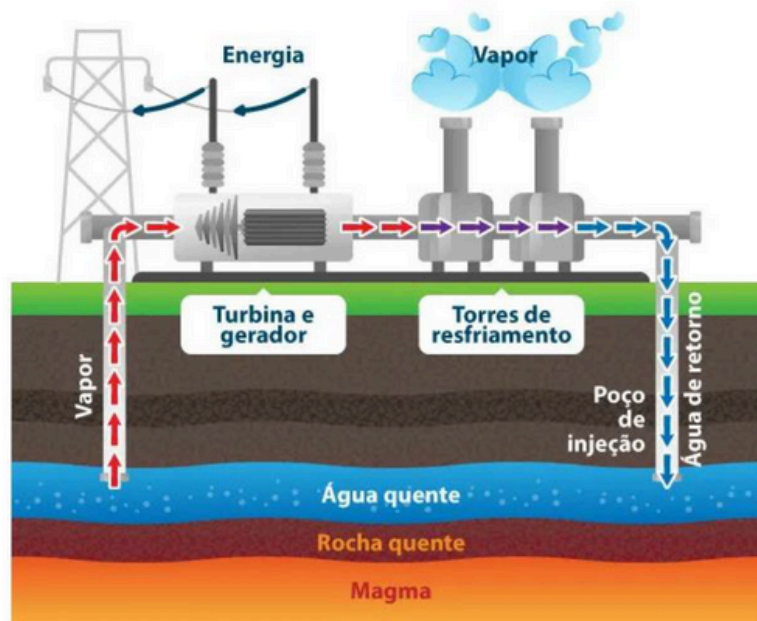


Figura 1: Representação de uma usina geotérmica.

Embora a geração de eletricidade via recursos geotérmicos ofereça um **menor impacto ambiental em comparação com os combustíveis fósseis**, se faz necessário uma abrangente avaliação do impacto econômico e social nas comunidades que irão usufruir de tal projeto.

Isso ocorre pois existe a necessidade de se fazer uma identificação prévia das **áreas com potencial geotérmico**, que estão associadas a atividades vulcânicas, tais como, **vulcões ativos, gêiseres** e áreas com **alta atividade tectônica**, onde o calor do interior da Terra é mais acessível próximo à superfície.



Dessa forma, os resultados obtidos, além de serem comparados com outras fontes de energia renovável, irão influenciar nas **condições econômicas, políticas e sociais** da região implementada, uma vez que além da geração de energia, ela é aplicada em campos alternativos como **hidroterapia, agricultura, aquecimento ambiente e fins medicinais** devido à sua natureza renovável, livre de poluição.

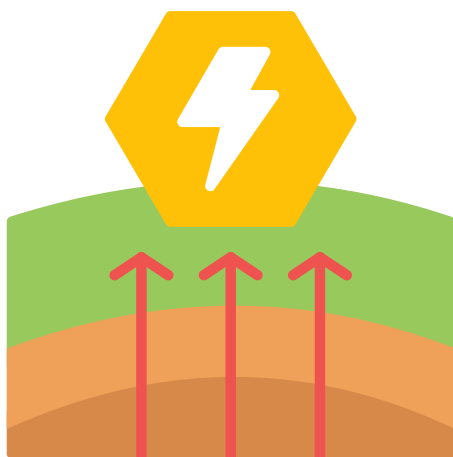
Outra importante aplicação da energia geotérmica, é a sua performance em ambientes domésticos, podendo ajudar a **reduzir o consumo total de energia entre 30 e 70%**, uma vez que consegue **desempenhar a função de caldeira**, para aquecer a **água usada na cozinha, banheiros e até piscinas**.

No Brasil as fontes geotérmicas, na sua grande maioria, estão situadas em áreas de bacias sedimentares, sendo pouco exploradas no país.

O uso de fontes geotérmicas no Brasil está mais associado à recreação e ao lazer do que à geração de eletricidade e as atividades econômicas, como na indústria e na atividade agrícola.



O maior potencial geotérmico para a exploração econômica fica nos estados de **Goiás, Paraná, São Paulo, Santa Catarina e Tocantins**. Atualmente, as fontes geotérmicas são utilizadas em áreas de recreio nas cidades de **Caldas Novas (GO)** e **Poços de Caldas (MG)**.



De uma forma geral, atingir uma produção de **energia geotérmica eficaz** passa por um importante estudo de conhecimento do funcionamento térmico do interior do planeta, que servirá não somente para a **produção geotérmica**, como também ajuda a ampliar as explorações de petróleo e gás.

Assim, **conhecer a temperatura interna da Terra é vital para definir as técnicas e equipamentos de extração e perfuração**, uma vez que o interior da Terra é constituído pela crosta terrestre, pelo manto e pelo núcleo em grande parte.

A crosta é formada por grandes **blocos rochosos**. O manto é denso e se divide em **manto superior** e **manto inferior**, é nele que se encontra o **magma**. O núcleo também é dividido em externo e interno, a **parte externa é de consistência líquida** e a **parte interna é mais sólida e densa**. Então a Terra é basicamente formada por **rochas e metais**. A figura 2 mostra a composição da **estrutura da crosta terrestre**.

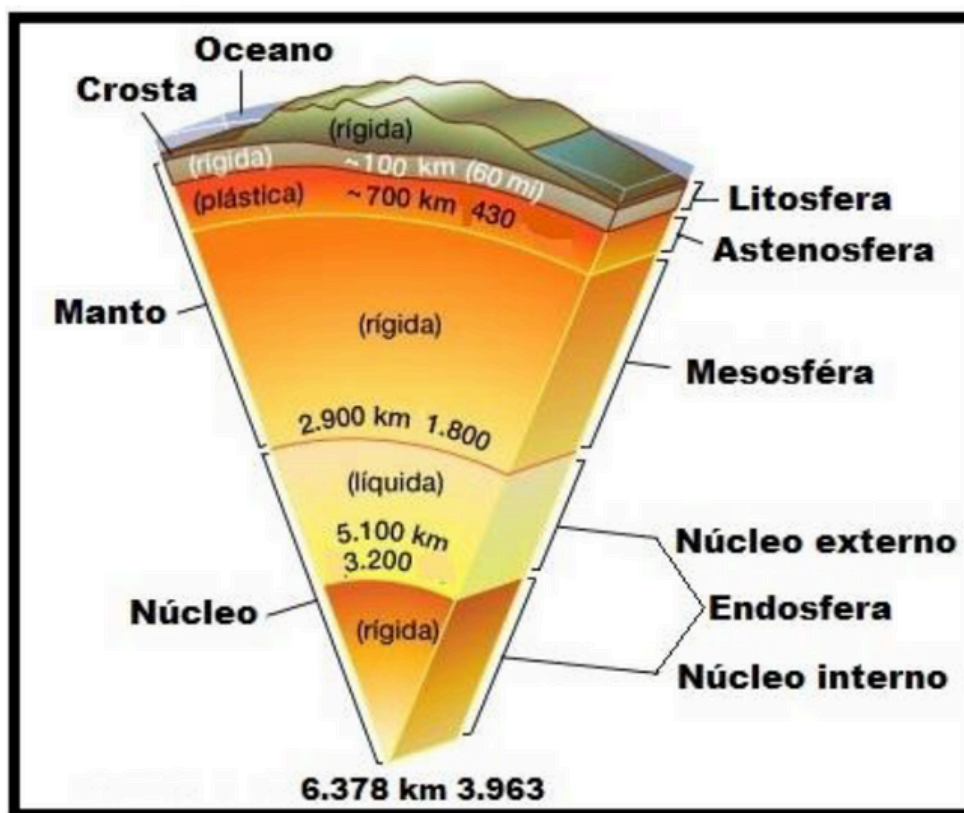


Figura 2: Representação esquemática da estrutura da crosta terrestre, e suas respectivas espessuras.

Portanto, à medida que ocorre a perfuração e um consequente aumento de profundidade para conectar a superfície a uma região de extração de calor geotérmico, encontram-se **rochas derretidas devido ao gradiente aumento de temperatura** (Fig. 3).

Esse calor flui de maneira variável para superfície via **condução térmica**, uma vez que depende das condições geológicas e tectônicas da região.

Neste contexto, as áreas vulcânicas apresentam um **elevado potencial para utilização da energia térmica**, principalmente nos limites das placas tectônicas, uma vez que suas temperaturas internas são bem mais elevadas.

As áreas geotérmicas são classificadas em função da sua temperatura, como baixa (< 150°C, maior abundância), média (150 - 200 °C) e alta (> 200°C).

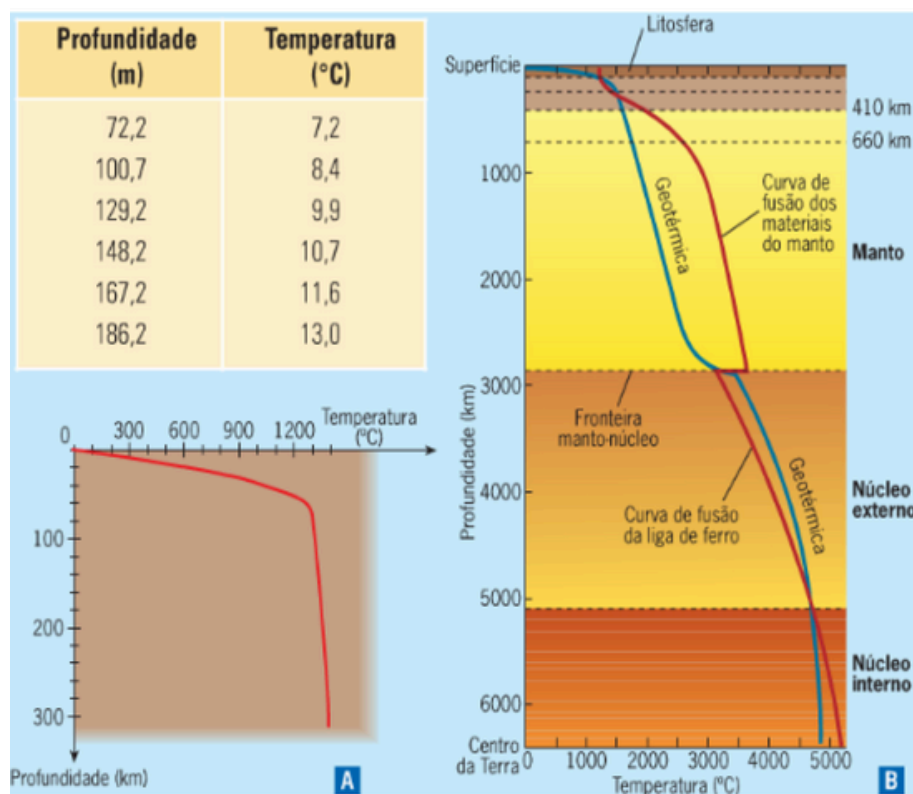


Figura 3: Representação esquemática da crosta terrestre, indicando o gradiente de temperatura (a) e relação entre temperatura e profundidade (b).

Assim, o proveito que se pode tirar da energia geotérmica para a aplicação pretendida, é exemplificada no diagrama abaixo, conhecido como **diagrama de Lindal** (Fig. 4).

Por ele verifica-se que o aproveitamento é basicamente feito por **bombas de calor geotérmico**, que aproveita a diferença de calor entre solo e ambiente ($< 30^{\circ}\text{C}$), com utilização direta em indústria, aquecimento de ambiente, termas, entre outros ($20^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$) e por centrais geotérmicas a altas temperaturas ($> 150^{\circ}\text{C}$).

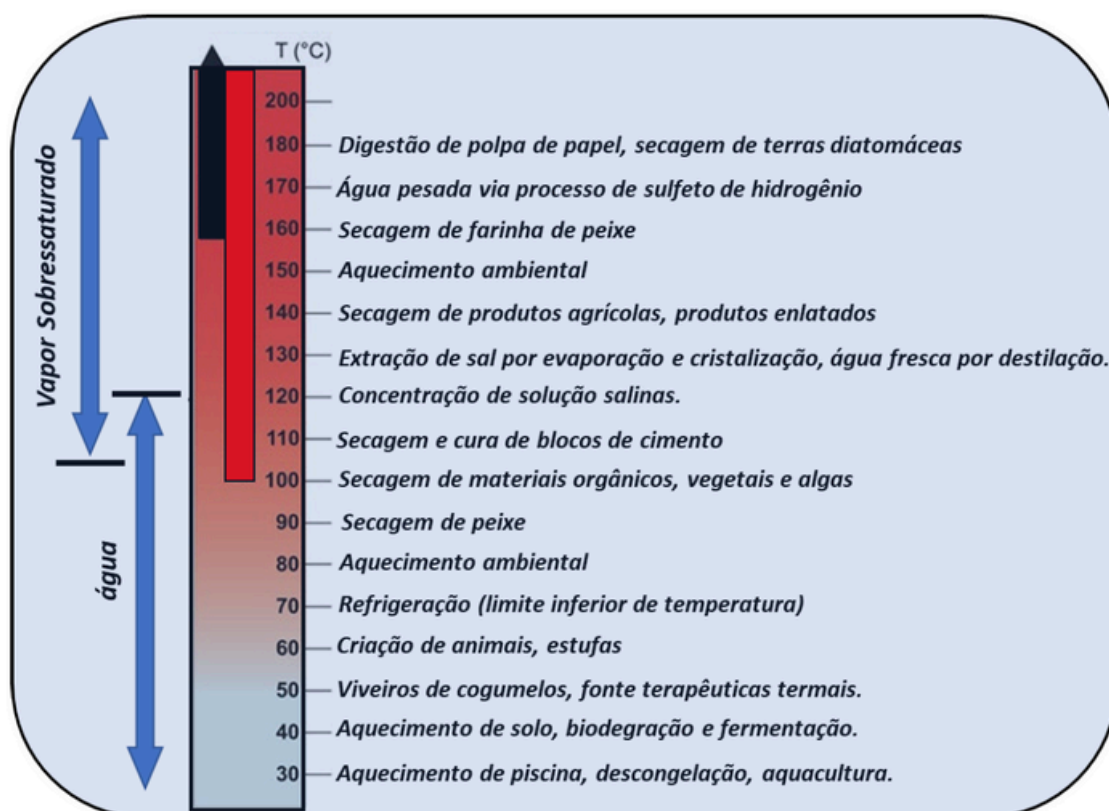


Figura 4: Representação diagrama de Lindal, referente as aplicações das fontes geotérmicas em função da temperatura.

Assim, perfurações mais profundas podem gerar **gêiseres superaquecidos com grandes pressões**, que tendem a fornecer energia limpa e abundante, contribuindo para a independência energética e a transição dos combustíveis fósseis, reduzindo a dependência de petróleo e gás. **Poços mais rasos já são utilizados há muito tempo para aquecer água para diversos usos.**

Estudos sobre os **recursos energéticos renováveis**, mostram que a participação dessas fontes no fornecimento total de energia seja de 15% em 2040, com uma taxa de aumento anual de 2,8%.



Neste ponto, a **energia geotérmica** pode desempenhar um papel significativo para atender às crescentes necessidades mundiais que demanda uma matriz energética com características **limpas, naturais e sustentáveis**.

A **energia geotérmica** tornou-se um componente notável na energia de sistemas e tem desempenhado um papel na produção de energia a partir de **fontes renováveis** desde o início do século XX.

Dados apontam que a produção global de eletricidade a partir de fontes de energia geotérmica foi de cerca de 87 TWh (0,3%) em 2020.

A capacidade total das usinas geotérmicas no mundo em 2015 era de cerca de 12,6 MW. Contudo, **esta capacidade atingiu 13.931 GW em 2019, o que é um grande incremento.**



Os **sistemas de refrigeração das centrais eléctricas** são componentes importantes, uma vez que representam uma grande parte do custo total de produção e afetam diretamente a eficiência da planta e a **capacidade de produção de energia**.



A **energia geotérmica** representa uma **solução promissora e sustentável** para desafios energéticos contemporâneos, uma vez que apresenta um **estoque praticamente inesgotável** no curto prazo, independência das condições climáticas, **baixa emissão de CO₂** e redução do impacto ambiental.

Para um futuro energético mais **seguro e sustentável**, é essencial continuar investindo em **tecnologia geotérmica** e expandir sua utilização, pois a mesma abre a possibilidade de **impulsionar o desenvolvimento econômico local**, além de trazer a possibilidade de **geração de um grande número de empregos**.

REFERÊNCIAS

Soltani, M., et al. "**Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems.**" Renewable and Sustainable Energy Reviews 140 (2021): 110750.

Lund, John W., and Aniko N. Toth. "**Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review.**" Geothermics 90 (2021): 101915.

Sharmin, Tasnuva, et al. "**A state-of-the-art review on geothermal energy extraction, utilization, and improvement strategies: conventional, hybridized, and enhanced geothermal systems.**" International Journal of Thermofluids 18 (2023): 100323.

REFERÊNCIAS

- Jamil, Farrukh, et al. **"A critical review on the effective utilization of geothermal energy."** Energy & Environment 35.1 (2024): 438-457.
- T. Boßmann, I. Staffell, **The shape of future electricity demand: exploring load curves in 2050s Germany and Britain**, Energy 90 (2015) 1317–1333.
- B. Cetin, M. Abacioglu, **Economic analysis for rebuilding of an aged pulverized coal-fired boiler with a new boiler in an aged thermal power plant**, Adv. Mech. Eng. 5 (2013) 1–6.
- B. Cetin, **An economic model for the revamping of a pulverized coal-fired boiler**, Energy Sources B Energy Econ. Plann. 9 (3) (2014) 307–313.
- B. Cetin, H. Avci, **Technic and economic analysis of the conversion of an existing coal-fired thermal power plant to solar-aided hybrid power plant**, J. Facul. Eng. Architect. Gazi Univ. 35 (2020) 1027–1045.
- M. Sinambela, M. Situmorang, K. Tarigan, S. Humaidi, T. Rahayu, **Design of solar power system for the new mini region of broadband seismometer shelter in Tiganderket, Karo, North Sumatera, Indonesia, Case Stud.** Therm. Eng. 22 (2020) 100747.
- BP Energy, **BP Energy Outlook 2019 Edition**, 2019. London, United Kingdom.
- D.O. Dunikov, **Cycle improvement and hydrogen steam superheating at Mutnovsky geothermal power plant**, Case Stud. Therm. Eng. 12 (2018) 736–741.
- A. Paulillo, L. Cotton, R. Law, A. Striolo, P. Lettieri, **Geothermal energy in the UK: the life-cycle environmental impacts of electricity production from the United Downs Deep Geothermal Power project**, J. Clean. Prod. 249 (2020) 119410

REFERÊNCIAS

T. Shinya, Y. Satoshi, **A Desktop Review of Calculation Equations for Geothermal Volumetric Assessment**. PROCEEDINGS, 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 12-14, 2018.

AGEA; AGEG, 2010. **Geothermal Lexicon For Resource and Reservoirs Definition and Reporting**, Edition 2, -: Australian Geothermal Energy Group, 90p.,
[http://geothermal.statedevelopment.sa.gov.au/__data/assets/pdf_file/0006/147876/Geothermal_Lexicon_2010.pdf].

Bodvarsson, G., 1974. **Geothermal Resource Energetics**, s.l.: Geothermics, v.3 - no.3, p.83-92,

Ernst & Young ShinNihon LLC, et. al, 2011. **Study on economic partnership projects in developing country in FY 2010; Study on geothermal power development project in Hululais, Indonesia**, -: Ministry of Economy, Trade and Industry, 8p.,

Garg, S., 2010. **Appropriate use of USGS volumetric "heat in place" method and Monte Carlo calculations**, -: Proceedings, thirty-fourth workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford university,



CAPITULO 6

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA



4. Armazenamento de Energia

a. Introdução

(Alexandre Urbano)

Desde a primeira **revolução industrial**, a sociedade tem se tornado cada vez mais **dependente de fontes de energia para a movimentação de máquinas**, substituindo a força humana e animal. A **energia associada às quedas d'água** já era utilizada há milênios para movimentar moinhos, teares e outras máquinas que pudessem ser instaladas próximas a essas fontes naturais.

Com o advento das **máquinas térmicas**, otimizadas por James Watt 1736 – 1819, houve uma grande revolução na indústria, aumentando vertiginosamente a escala de produção.

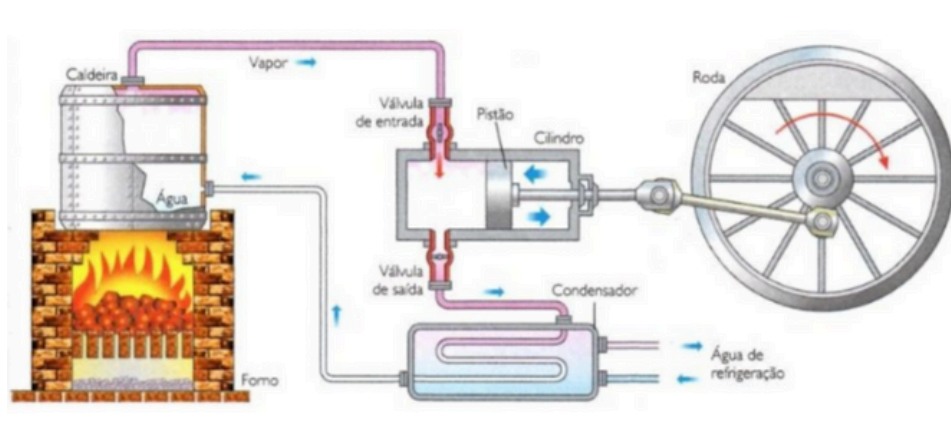


Figura 1: Esquema de funcionamento da Máquina a Vapor

Essas **máquinas térmicas**, movidas a carvão ou outros combustíveis que produzissem calor pela queima, também passaram a ser utilizadas em locomotivas, **impactando globalmente a forma de movimentação humana e de cargas pelo planeta.**



Em 1800, o italiano Alessandro Volta inventou a pilha, o primeiro gerador de eletricidade feito a partir de dois diferentes metais separados por um tecido embebido com eletrólito. O invento de Volta propiciou um controle da eletricidade até então inédito para a humanidade.

Antes dele, a eletricidade era conhecida principalmente pelos **fenômenos de eletrização** que resultavam em **descargas elétricas incontroláveis**, como os relâmpagos, para citar um evento natural.



As **pilhas** impulsionaram o **desenvolvimento da eletricidade** e proporcionaram a incrível descoberta de que os **fenômenos magnéticos possuíam uma íntima relação com os elétricos**.

Desta correlação entre **eletricidade e magnetismo** surgiram os motores elétricos e os geradores de energia elétrica por indução, que são, na verdade, **equipamentos simétricos**: um recebe energia elétrica e gera movimento, enquanto o outro recebe movimento e gera energia elétrica.

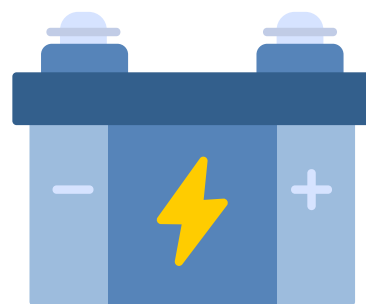


Com a **eletricidade e os equipamentos elétricos**, a miniaturização ganhou importância tecnológica em inúmeras inovações. Os **motores ficaram menores e mais potentes** e passaram a equipar uma infinidade de dispositivos que nos acompanham até os dias de hoje.

b. Pilhas e Baterias

(Alexandre Urbano)

As **fontes de energia elétrica** por indução também evoluíram desde então, porém, as pilhas não tiveram a mesma taxa de crescimento e aperfeiçoamento que os geradores, levando décadas para que inovações disruptivas fossem introduzidas.



Esses eventos de evolução dos sistemas de **armazenamento eletroquímicos** podem ser divididos em poucos grupos:

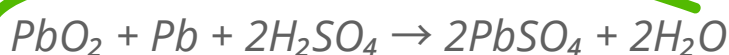
- Pilhas de Chumbo-Ácido (1850),
- Pilhas de Níquel-Cádmio (1920),
- Pilhas de Íon-Lítio (1990).

Nota-se um intervalo de pelo menos 70 anos entre as revoluções nesse campo.

Desde Volta não houve alteração significativa no design de uma bateria, a natureza ainda nos impõe que sigamos a **arquitetura de dois eletrodos separados por um eletrólito**.

As baterias de chumbo-ácido operam à base de chumbo (Pb) como ânodo e de **dióxido de chumbo** (PbO₂) como **cátodo**, **imersos em uma solução aquosa de ácido sulfúrico** (H₂SO₄) como eletrólito.

Durante a descarga, ocorre a reação redox onde o chumbo do ânodo é oxidado a sulfato de chumbo (PbSO₄) e o dióxido de chumbo do cátodo é reduzido a sulfato de chumbo, liberando energia elétrica. A reação global é representada por:



A **eficiência energética das baterias de chumbo-ácido é relativamente baixa**, variando entre 60-100 Wh/L e 30-40 Wh/kg, ou seja, são mais volumosas e pesadas comparadas a outras tecnologias mais recentes como veremos adiante (Figura 2).

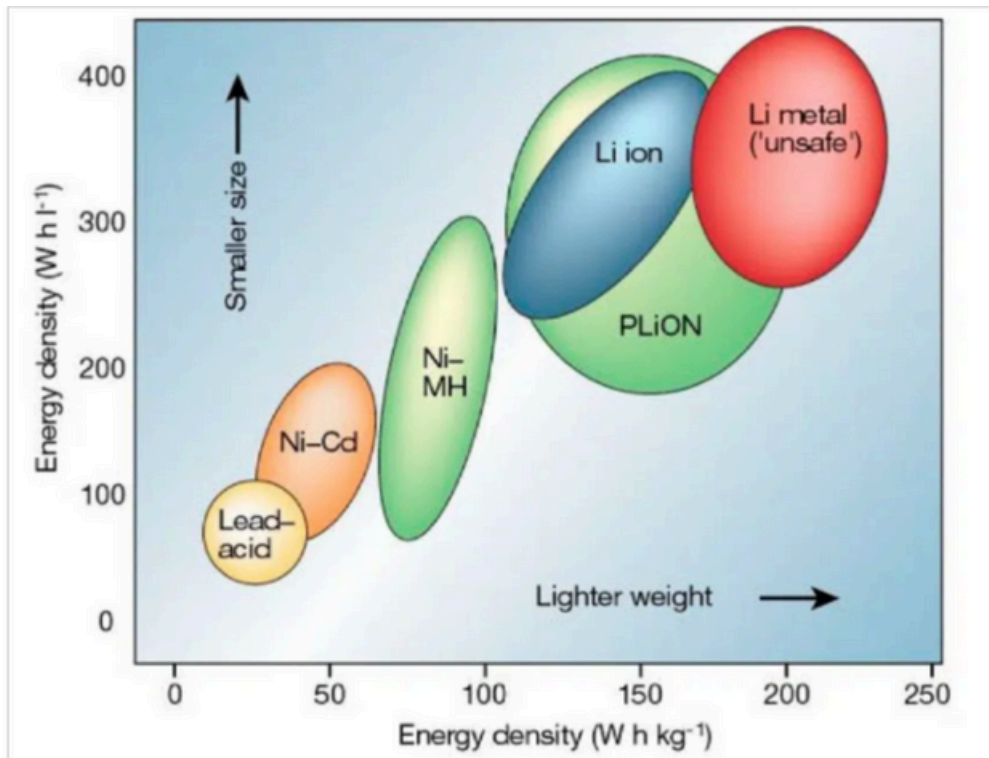
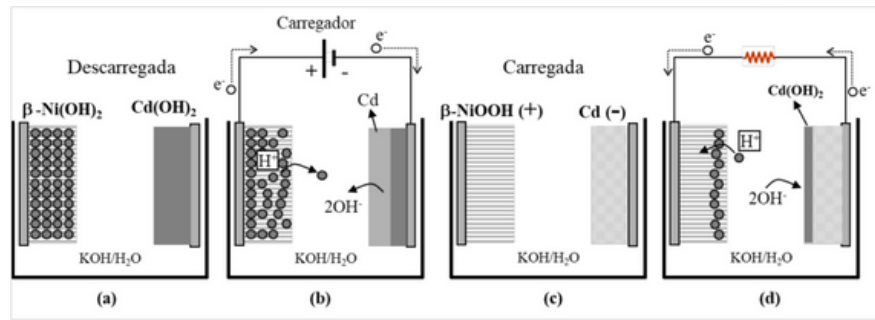


Figura 2: Eficiência energética das baterias de chumbo-ácido

Uma evolução às baterias de Pb ácido foram as baterias de **Níquel-Cádmio** (Ni-Cd) e, mais recentemente, as de **Níquel-Hidreto Metálico** (Ni-MH). Esses dois sistemas à base de níquel têm em comum o cátodo (+) composto por **Hidróxido de níquel** (NiOH_2), enquanto os ânodos são, respectivamente, **Hidróxido de Cádmio** (CdOH_2) e uma liga intermetálica de **Lantânio Níquel** ($\text{M}=\text{LaNi}_5$).

Esta liga substituiu o cádmio, o que tornou esse sistema **ambientalmente amigável**. O princípio de funcionamento destes dois sistemas são mostrados na figura a seguir:

[Ni-Cd] →



[Ni-MH] →

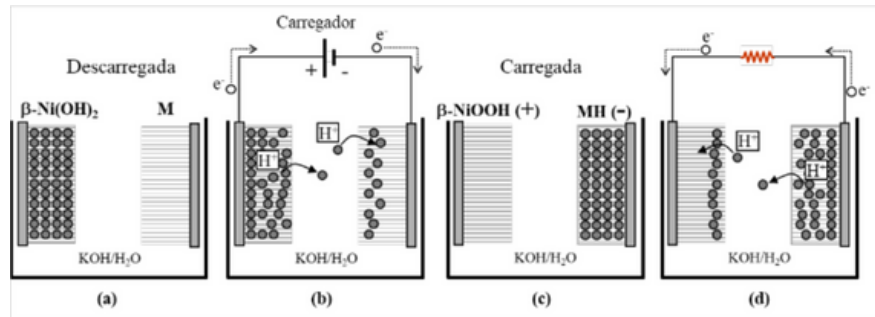
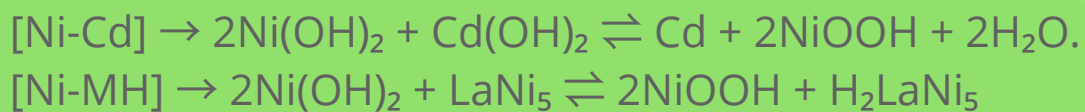


Figura 3

No processo de carga o íon hidrogênio transita entre um eletrodo e outro conforme mostram as reações redox:



A eficiência energética das baterias Ni-Cd varia de 100 à 200 Wh/L e 40-60 Wh/kg, enquanto as Ni-MH podem alcançar até 300 Wh/L e 100 Wh/kg.

Apesar de possuir vantagens competitivas frente às baterias de Pb ácido, **essas baterias são susceptíveis ao efeito memória**, que reduz drasticamente sua capacidade energética se os processos de carga e descarga não seguirem a um rígido protocolo elétrico.



As baterias de íon-lítio, por outro lado, funcionam com base em um sistema que envolve o **movimento de íons de lítio** entre o **ânodo e o cátodo** através de um **eletrólito não aquoso, orgânico e combustível**.

O **ânodo** é feito de **grafite**, enquanto o **cátodo** é composto por um **óxido de metal litiado** (LiCoO_2). Durante a descarga, os íons de lítio se movem do ânodo para o cátodo, **liberando energia**, enquanto na carga, o processo é revertido (figura abaixo). A reação redox global é:



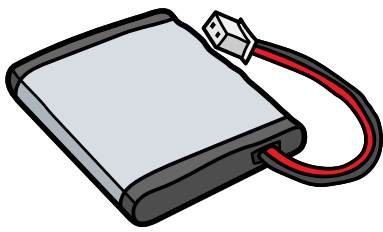
As baterias de íon-lítio apresentam uma **densidade energética significativamente alta**, variando de 150-250 Wh/kg, o que as torna ideais para dispositivos que requerem **alta densidade de energia e leveza**, como smartphones, laptops e veículos elétricos.

No entanto, o **eletrólito é inflamável e os riscos associados ao superaquecimento e vazamento representam desafios de segurança** que ainda precisam ser aprimorados.

Em relação às **pilhas de chumbo-ácido**, a tecnologia de níquel-cádmio trouxe vantagens como **melhor desempenho, menor peso e maior capacidade de miniaturização**, com seu maior desenvolvimento ocorrendo durante a Segunda Guerra Mundial.

Já o **sistema de íon-lítio** veio substituir as baterias à base de níquel principalmente pela **baixa toxicidade** e **alta densidade de energia**.

Sobre essa **diferença energética**, enquanto uma pilha de íon-lítio oferece uma diferença de potencial de 3,6 V, uma pilha de Ni-Cd, ou Ni-MH, oferece apenas 1,2 V, fazendo com que uma única pilha de íon-lítio substitua três pilhas de Ni-Cd ou Ni-MH, para fornecer a **mesma quantidade de energia elétrica**.



Além disso, a **pilha de íon-lítio é bastante leve**, uma vez que seus componentes são elementos de baixo peso atômico, aumentando assim sua densidade de energia (Wh/kg).

Com essas características, as **pilhas de íon-lítio revolucionaram o abastecimento de equipamentos portáteis**, permitindo o surgimento e aprimoramento de diversos sistemas, desde **máquinas fotográficas, filmadoras, laptops e telefones celulares até veículos voadores, como drones, e veículos elétricos.**

Todos esses equipamentos têm em comum a necessidade de mobilidade, e, neste quesito, o baixo peso da fonte de energia elétrica é fundamental para seu sucesso.

Apesar do sucesso da tecnologia de íon-lítio, o desafio atual é encontrar **novos materiais para substituir os componentes** dessas baterias, visto que são **escassos no globo terrestre**.

Essas baterias são baseadas em **lítio e cobalto, dois elementos pouco abundantes e disponíveis apenas em regiões de alta instabilidade política**, como o país, que ao menos no nome não vive uma ditadura, que é a República Democrática do Congo.

Na **figura 4** são apresentados um **panorama da distribuição geográfica do lítio e do cobalto pelo mundo**. A busca por alternativas mais sustentáveis é crucial para garantir a continuidade do avanço tecnológico e a mitigação dos impactos ambientais e sociais associados à extração desses materiais.

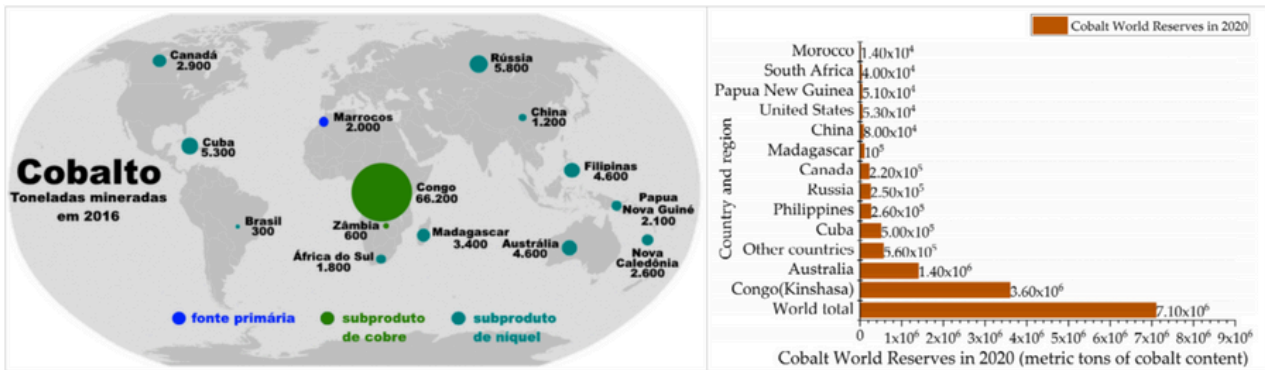


Figura 4: Panorama da distribuição geográfica do lítio e do cobalto pelo mundo

As **baterias de íon lítio encontram-se na 4ª geração tecnológica**, com inovações nas suas diversas partes como eletrólito (sais e reagentes), mas principalmente, na composição do eletrodo positivo (cátodo).

A 1ª geração do cátodo era de **óxido de cobalto litiado** (LiCoO_2), porém com a demanda pela substituição do cobalto pelos motivos relatados acima, pesquisas e desenvolvimentos foram conduzidos para sua completa ou parcial substituição.

Assim, os cátodos evoluíram para **misturas com níquel e manganês** culminando nas misturas $\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$ com diversas estequiometrias para os metais, como a NMC333 e a NMC622 e a NMC811, caracterizando a 2ª e 3ª geração.

A 4ª geração são **eletrodos de LiFePO_4** (lítio fosfato), que são ambientalmente amigáveis, de baixo custo e de alto desempenho, principalmente para veículos elétricos.

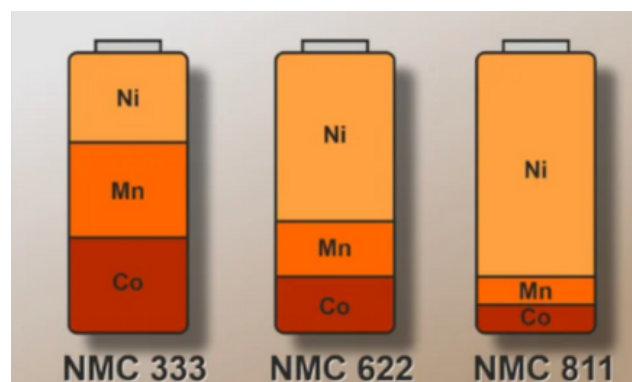


Figura 5

As **pilhas e baterias** além de abastecerem os dispositivos eletrônicos portáteis ou móveis continuam sendo uma alternativa para o **armazenamento de energia elétrica** gerada por sistemas de energia intermitente como a geração eólica ou a fotovoltaica.

As pilhas e baterias concorrem com o maior sistema de armazenamento de energia disponível para a sociedade que são as barragens de usinas hidroelétricas.

As barragens ao acumularem água no seu reservatório se parecem muito com o armazenamento de energia nas baterias. **Quanto mais água no reservatório mais energia acumulada.**

Mas, assim como se busca formas de **geração de energia elétrica com baixa ou nenhuma emissão de carbono** para a atmosfera, devido aos seus impactos no aquecimento global, há também uma forte tendência de **diminuir o número de barragens por causa do alto risco de rompimento**, e consequentes enchentes, e ao alagamento de grandes áreas de mata nativa.

Assim, as **baterias** ressurgem como alternativas para atuarem também como sistemas de **armazenamento da produção de energia excedente**, conectando-se aos sistemas intermitentes e promovendo a eficiência de todo sistema.



À medida que buscamos **alternativas mais sustentáveis para o armazenamento de energia**, novas tecnologias emergem de forma a se juntar às baterias recarregáveis. Entre essas inovações, destacam-se os **supercapacitores e o hidrogênio verde**.

Os **supercapacitores** oferecem a vantagem de cargas e descargas extremamente rápidas, e, o **hidrogênio verde** é uma solução cada vez mais promissora como fonte de energia limpa e renovável.

Ambos os sistemas apresentam um significativo potencial para **revolucionar a forma como armazenamos energia**.

Nos próximos tópicos, exploraremos os avanços e desafios associados aos **supercapacitores** e ao **hidrogênio verde**, destacando suas aplicações práticas e o papel que desempenharão na transição para um futuro mais sustentável.

c. Supercapacitores

(Ivair Aparecido dos Santos)

Supercapacitores são capacitores capazes de acumular uma **alta quantidade de carga e energia elétrica em seu interior**. Esses capacitores, em contraste com baterias (que possuem alta densidade de energia), possuem elevada potência e baixa densidade energética [1].

Capacitores, ou condensadores, são dispositivos elétricos capazes de armazenar cargas elétricas em seu interior. No Sistema Internacional de Unidades, a capacitância é dada em farad (F), que equivale a coulombs por volt (C/V). Quando submetidos a uma diferença de potencial, energia potencial elétrica é acumulada no campo elétrico gerado no interior do capacitor [4].

Essas características, aliadas ao fato de que possuem um **ciclo de vida muito longo, rápidos e controlados ciclos de carga/descarga**, além de um baixo custo de produção, ditam as possíveis aplicações para esse tipo de dispositivo na coleta/conversão e uso racional de energia.

Potência elétrica é a medida da quantidade de energia elétrica que é fornecida ou consumida por um circuito elétrico, por unidade de tempo. Quanto maior a potência elétrica, maior é a quantidade de energia fornecida/consumida pelo circuito (de um chuveiro, por exemplo), por unidade de tempo. No Sistema internacional de Unidades a unidade de medida da potência elétrica é o Watt (W), que equivale a joules por segundo (J/s) [5].

Na verdade, e por possuírem **alta potência energética** e um **ciclo de carga/descarga muito curto**, os supercapacitores podem entregar **elevadas quantidades de energia** (alta potência!) em um curto intervalo de tempo.

Por isso, e como ilustrado na Figura 1, são usados em sistemas auxiliares de retomada de aceleração/potência em **veículos elétricos**, por exemplo [2].

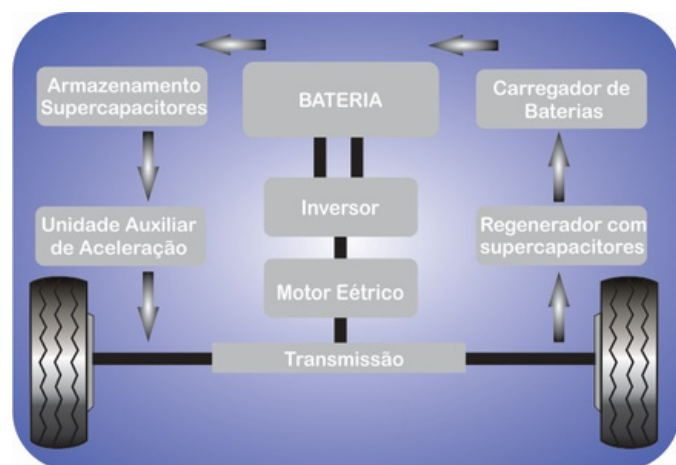


Figura 1 - Modelo esquemático da integração de supercapacitores aos sistemas de controle de potência e autogeração de energia (coleta regenerativa da energia da frenagem) em automóveis elétricos.

Eles também possuem a capacidade de serem **recarregados muito rapidamente**, o que faz com que eles sejam usados na **coleta da energia térmica dissipada nos sistemas de frenagem de carros e aviões** [2].

Como podemos observar na Figura 1, os **supercapacitores** podem ser empregadas em **sistemas híbridos coleta/entrega em veículos elétricos**, compondo o circuito que permite, por exemplo, em um primeiro momento **coletar a energia térmica associada a frenagem** para entregá-la aos sistemas principais de armazenamento de energia elétrica (baterias de íon-Lítio, por exemplo).

Em um segundo momento, quando grandes quantidades de energia são demandadas para iniciar ou retomar o movimento (pense em um ônibus lotado deixando a estação!), o **sistema de tração pode ser abastecido de forma muito rápida** com energia extra advinda dos **supercapacitores** integrados a uma unidade auxiliar de aceleração, por exemplo.

Ou seja, o emprego de **supercapacitores** em sistemas regenerativos dá flexibilidade ao sistema e permite a coleta e uso racional de energia, tudo ao mesmo tempo.



Podemos perceber, então, que **baterias e supercapacitores** são, em última análise, dispositivos usados para armazenar energia elétrica.

Contudo, cada um desses dispositivos cumpre um propósito e deve ser usado em situações ou demandas específicas.

Baterias, em geral, são empregadas em sistemas que necessitam de **energia elétrica por longos períodos**, como no caso de telefones celulares, enquanto **supercapacitores são empregados em sistemas que demandam uma elevada quantidade de energia por um curto intervalo de tempo**, como nos sistemas de retomada de aceleração em automóveis elétricos.

A questão que permanece, portanto, é saber porque dispositivos que têm a mesma finalidade, ou seja, **armazenar energia elétrica**, possuem **propriedades e características tão distintas** que, em última análise, ditam seu emprego nas mais diversas áreas onde são utilizados.

Essa é, de fato, uma questão complexa, que envolve respostas complementares entre si, que exigem desde conhecimentos de Química Básica, até as mais avançadas técnicas de processamento de materiais, seara das chamadas **Ciências do Materiais**.

Do ponto de vista dos processos intrínsecos que descrevem o funcionamento de **baterias e supercapacitores**, a principal diferença entre eles encontra-se nos **processos eletroquímicos que ocorrem em seu interior** [2,3].

De fato, em **baterias tipo íon-lítio** (Li^+), por exemplo, os íons de lítio participam da reação redox de uma maneira que pode ser controlada ajustando-se a difusão desses íons na estrutura da bateria, o que permite que tais **dispositivos entreguem carga/energia elétrica por longos períodos**.

Além disso, como a difusão se dá para o interior dos eletrodos da bateria, há um elevado **acúmulo de cargas elétricas nesses dispositivos**, o que caracteriza a **alta densidade de energia elétrica** típica das baterias.

Já no caso dos **supercapacitores**, a carga é **armazenada por adsorção** dos íons do eletrólito na superfície do anodo e do catodo.

A adsorção é o processo físico-químico em que as moléculas, átomos ou íons ficam retidos na superfície de uma substância (geralmente um sólido). Ela pode se dar por meio da quimissorção, ou seja, por meio de ligações químicas, ou por fisissorção, quando interações físicas (dípolo-dípolo ou dipolo-induzido, chamadas de forças de Van de Waals) estão presentes.

Como as **reações redox** não estão presentes, a **descarga elétrica** (transferência das cargas elétricas para o circuito) **é muito mais rápida**, já que ela não é limitada por processos de difusão, como no caso das baterias.

Desta forma, os **supercapacitores podem entregar uma grande quantidade de carga/energia elétrica em um intervalo de tempo muito curto**, que é o que caracteriza a elevada potência elétrica desses dispositivos.

No entanto, como a carga é confinada à superfície dos eletrodos, a **densidade de energia é em geral muito menor nos supercapacitores quando comparados às baterias**. Pode-se concluir, então, que os **processos de difusão (baterias) e adsorção (supercapacitores) é que ditam a velocidade com que esses dispositivos podem ser recarregados.**

Como a difusão tende a ser um processo bem mais lento que a adsorção, as **baterias usualmente necessitam de tempos bem mais longos para sua recarga** quando comparadas aos **supercapacitores**.

Já no que concerne à **estrutura** e o tipo de **materiais** utilizados na produção de **baterias** ou de **supercapacitores**, as diferenças são marcantes e afetam o **desempenho** desses dispositivos de forma decisiva. Em ambos os casos, diferentes tipos de materiais podem ser empregados na constituição dos elementos básicos desses dispositivos.

No caso das **baterias**, como ilustrado na Figura 2(a), diferentes materiais podem ser empregados como **anodo** ou **catodo**, e o **eletrólito** pode ser **líquido** ou **sólido**.

Já no caso dos **supercapacitores**, eles podem ter várias camadas internas e/ou ser **constituídos de materiais porosos** de **elevada área superficial** ou **mesmo materiais nanoestruturados** (Figura 2(b)), o que aumenta a densidade de carga acumulada em função do aumento da superfície adsorvente.

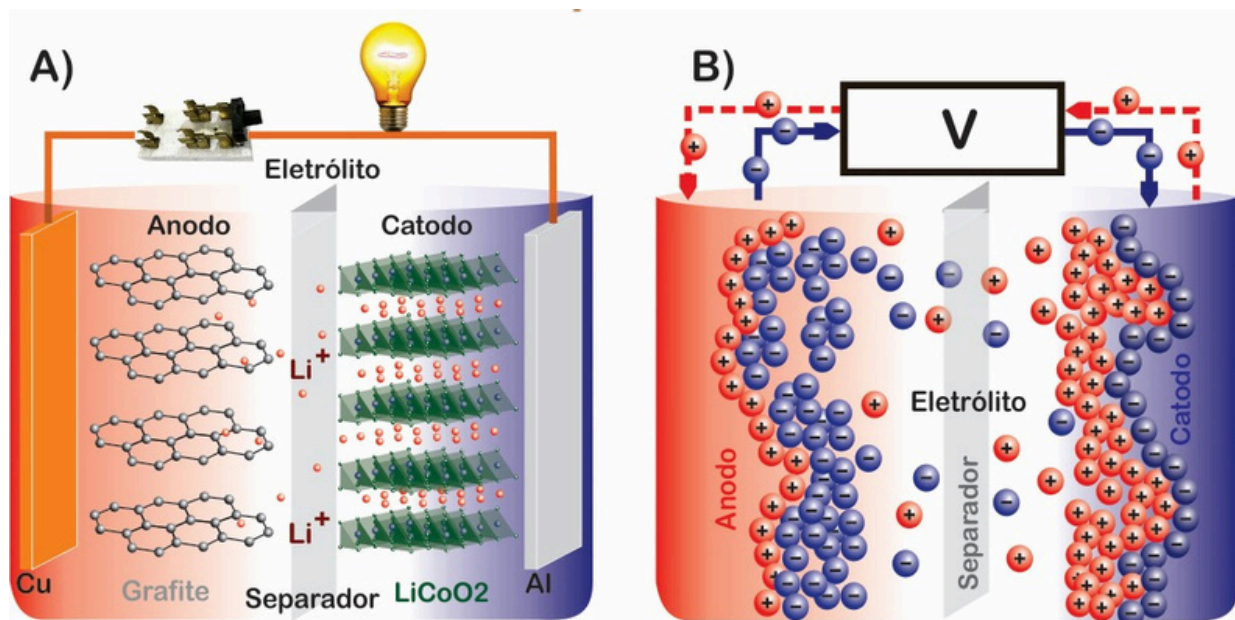


Figura 2 - (a) Modelo esquemático de funcionamento de uma bateria de íon-lítio, no qual os íons do eletrólito são difundidos pelo interior do anodo e do catodo. (B) Modelo esquemático de funcionamento de um supercapacitor em que as cargas são adsorvidas nas superfícies porosas (alta área superficial/adsorvente) do anodo e do catodo.

REFERÊNCIAS

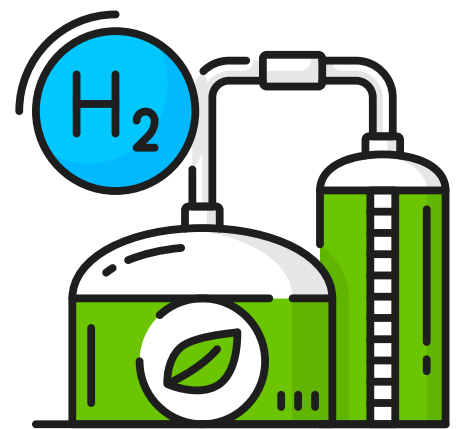
- [1] ENERGY EDUCATION. **Supercapacitor**. Disponível em: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Supercapacitor>. Em 29/07/2024
- [2] P. Simon, Y. Gogotsi, B. Dunn. **Where Do Batteries End and Supercapacitors Begin?** Science, 343, p. 1210-1211. 2014. DOI:10.1126/science.1249625
- [3] J. M. Lim, Y. S. Jang, H. V. T. Nguyen, J. S. Kim, Y. Yoon, B. J. Park, D. H. Seo, K. Lee, Z. Han, K. Ostrikov, S. G. Doo. **Advances in high-voltage supercapacitors for energy storage systems: materials and electrolyte tailoring to implementation**. Nanoscale Adv., 2023, 5, 615. DOI: 10.1039/d2na00863g

e. Hidrogênio, produção e impacto na descarbonização do setor energético

(Alexandre Urbano)

O **hidrogênio** está ganhando destaque como uma solução energética essencial para a transição rumo a uma **economia descarbonizada e sustentável**. Suas principais vantagens incluem **alta densidade energética, versatilidade de uso** e a possibilidade de funcionar como um **vetor de armazenamento de energia**.

Dependendo de seu processo de produção, o **hidrogênio** pode ser uma **fonte de energia de baixo ou nulo carbono**, o que o torna atraente para setores de difícil eletrificação, como transporte pesado, aviação, siderurgia e a produção de fertilizantes.



Uma das grandes promessas do hidrogênio é sua **capacidade de armazenar energia gerada por fontes intermitentes**, como a energia solar e eólica. Esses tipos de energia são **variáveis** e dependem de **fatores climáticos**, o que pode gerar desafios para a **estabilidade da rede elétrica**.

Nesse contexto, o **hidrogênio atua como um vetor de armazenamento**, permitindo a captura e a conversão da energia excedente produzida em períodos de alta geração e baixa demanda.

Essa energia pode ser armazenada e utilizada posteriormente, contribuindo para a maior penetração de fontes renováveis no mix energético e garantindo uma oferta constante de energia limpa.

O processo de **eletrólise da água** (figura abaixo), quando alimentado por eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, é uma das principais rotas para a **produção de hidrogênio verde**.

Esse tipo de **hidrogênio** é caracterizado por sua produção **sem emissão de gases de efeito estufa**, contribuindo diretamente para a descarbonização da economia.

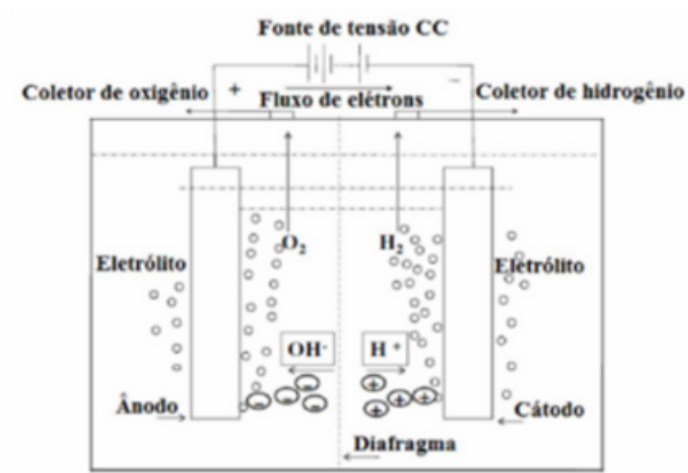


Figura 1 - Desenho esquemático de um sistema básico de eletrólise alcalina da água.

Além disso, o **hidrogênio** pode ser produzido a partir de diversas outras rotas tecnológicas, cada uma com diferentes impactos ambientais.

As diferentes cores associadas ao **hidrogênio** (figura 2) referem-se aos métodos de produção e ao impacto ambiental de cada uma delas.

O "hidrogênio marrom" e o "preto" são produzidos a partir da gaseificação do carvão mineral, sem a captura de carbono, resultando em altas emissões de CO₂.

O "hidrogênio cinza" é produzido a partir do gás natural, também sem captura de carbono, enquanto o "hidrogênio azul" é similar ao cinza, mas inclui tecnologias de captura, utilização e sequestro de carbono, reduzindo as emissões.

Já o "hidrogênio verde" é produzido via eletrólise da água utilizando fontes de energia renováveis, como solar e eólica, sendo a opção mais limpa e sustentável.



Além disso, há outras variantes, como o "hidrogênio rosa," produzido com eletricidade de usinas nucleares, e o "hidrogênio turquesa," que utiliza a pirolise do metano, gerando carbono sólido como resíduo.

Essas distinções permitem a **classificação do hidrogênio** em termos de sua contribuição para a **mitigação das emissões de gases de efeito estufa** e a prevenção das **mudanças climáticas globais**.

| Cor | Classificação | Descrição |
|-----|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ■ | hidrogênio preto | produzido de carvão mineral (antracito) sem CCUS |
| ■ | hidrogênio marrom | produzido de carvão mineral (hulha), sem CCUS |
| ■ | hidrogênio cinza | produzido do gás natural sem CCUS |
| ■ | hidrogênio azul | produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis) com CCUS |
| ■ | hidrogênio verde | produzido a partir de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar) via eletrólise da água. |
| ■ | hidrogênio branco | hidrogênio natural ou geológico |
| ■ | hidrogênio turquesa | produzido por craqueamento térmico do metano, sem gerar CO ₂ |
| ■ | hidrogênio musgo | produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica |

Figura 2 - Classificação de hidrogênio em escala de cores

Embora as **aplicações energéticas do hidrogênio** ainda enfrentem **desafios** significativos, como os **altos custos de produção** e as **dificuldades relacionadas ao transporte e armazenamento**, sua utilização é uma peça-chave na estratégia global de transição energética.

Dessa forma, o **hidrogênio** não apenas desempenha um **papel crucial na descarbonização dos sistemas de produção e consumo de energia**, mas também ajuda a integrar mercados de energia diversos, promovendo uma **transição energética mais dinâmica e sustentável**.

SOBRE OS AUTORES

ALEXANDRE URBANO

Possui bacharelado em Física (1992) pela Universidade Estadual de Londrina, e mestrado (1995) e doutorado (2002) em Física pela Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência na área de Física Experimental com ênfase em Ciências dos Materiais. É atuante na prospecção e consolidação da interação entre Universidade e Empresas. Seus objetos de estudos científicos são: novas eletrodos para baterias recarregáveis modernas, reciclagem de baterias, microbaterias, películas fotoativas, sensores, ciência e tecnologia do Vácuo, filmes finos, radiações ionizantes, cristalografia, microscopia eletrônica, eletroquímica e espectroscopias. Atualmente é Professor Associado do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina, e membro permanente do programa de Pós-Graduação em Física e do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física dessa instituição.

CLEBER SANTIAGO ALVES

Possui bacharelado (1993) em Engenharia Mecânica e mestrado (1996) em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (1996), e doutorado (2001) em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência na área de Engenharia dos Materiais, com ênfase em Materiais Magnéticos e Propriedades Magnéticas, atuando principalmente nos seguintes temas: efeito magnetocalórico e motores termomagnéticos. Atualmente é professor associado do Departamento de Engenharia Mecânica e membro permanente do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Maringá.

DIOGO ZAMPIERI MONTANHER

Possui bacharelado (2008), licenciatura (2011), mestrado (2010) e doutorado (2013) em Física pela Universidade Estadual de Maringá. Atua com desenvolvimento de dispositivos piezelétricos, fotoelétricos e multiferroicos. Atualmente é professor Adjunto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Guarapuava.

EDUARDO AUGUSTO CASTELLI ASTRATH

Possui licenciatura (2007), mestrado em Ensino de Física (2015) e doutorado em Física (2020) pela Universidade Estadual de Maringá. Atualmente é professor do Instituto Federal do Paraná, campus Paranavaí, atuando como professor em cursos do ensino técnico e ensino superior.

FLÁVIO CLARETH COLMAN

Possui bacharelado em Engenharia Mecânica (2007), mestrado em Engenharia Química (2012) e Doutorado em Química (2023) pela Universidade Estadual de Maringá. Tem experiência na área de Energias Renováveis e Desenvolvimento Sustentável com foco na investigação de novos materiais e projetos de máquinas térmicas i-calóricas. Possui nove cartas patente com 16 registros de propriedade intelectual junto ao Instituto Nacional de Propriedades Industrial. Atualmente é professor adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica e docente permanente do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Maringá.

GUSTAVO SANGUINO DIAS

Possui bacharelado (2007), mestrado (2010), doutorado (2013) e pós-doutorado (2014) em Física pela Universidade Estadual de Maringá. Atua síntese e caracterização de materiais multiferroicos, com ênfase nos materiais multiferroicos magnetoelétricos, atuando principalmente no estudo de correlações estrutura-propriedades. Possui ampla experiência em modelagem e impressão de projetos 3D para monitoramento e automação laboratorial. Tem experiência na área de Física e Engenharia de Materiais, com ênfase na síntese e caracterização de cerâmicas magnetoelétricas. Atualmente é professor Adjunto do Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá e membro permanente do curso de Pós-Graduação em Física dessa instituição.

IVAIR APARECIDO DOS SANTOS

Possui bacharelado (1994) e licenciatura (1994) em Física pela Universidade Estadual de Maringá, mestrado (1997) em Física pela Universidade Estadual de Campinas, doutorado (2001) e pós-doutorado (2002) em Física pela Universidade Federal de São Carlos, e pós-doutorado em Física (2016) pela University of Texas at San Antonio - EUA. Seus interesses estão voltados para o estudo e compreensão de relações estrutura/propriedades em materiais ferroicos, com especial ênfase ao desenvolvimento nano/microdispositivos avançados (transformadores, atuadores e sensores de estado sólido, células solares e memórias não voláteis de múltiplos estados). Atualmente é professor Associado do Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá, e membro permanente dos programas de Pós-Graduação em Física e Engenharia Mecânica dessa instituição. É vice coordenador do INCT Materiais Ferroicos para Conversores de Energia e coordenador geral do NAPI Energia Zero Carbono.

LUIZ FERNANDO CÓTICA

Possui bacharelado (1998), mestrado (2001) e doutorado (2005) em Física pela Universidade Estadual de Maringá, e pós-doutorado (2014) em Física pela University of Texas at San Antonio – EUA. Tem experiência na área de Física e Engenharia de Materiais, com ênfase na produção de materiais Multiferroicos e nanopartículas magnéticas para aplicações biomédicas. Atualmente é professor Associado do Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá e Docente Permanente dos Programas de Pós-graduação em Física e Biotecnologia Ambiental dessa Instituição.

LUIZ GUSTAVO DAVANSE DA SILVEIRA

Possui bacharelado (2007), mestrado (2010) e doutorado (2015) em Física pela Universidade Estadual de Maringá, e pós-doutorado (2016) em Física pelo Consiglio Nazionale delle Ricerche, CNR, Itália. Atualmente é professor adjunto do departamento de Física da Universidade Federal do Paraná.

RICARDO GOUVEIA TEODORO

Possui bacharelado em Engenharia Elétrica (2001) pela UEMG, bacharelado em Pedagogia Para Formadores de Educação Profissional pela Unisul (2009), mestrado em Engenharia Elétrica (2004) e doutorado em Controle e Instrumentação Eletrônica aplicado a Engenharia de Reabilitação (2018) pela UNESP. Desenvolve pesquisa na área de FES (Estimulação Elétrica Funcional) com aplicação de técnicas de controle robusto e chaveado operadas em modelos de plantas com incertezas, e na área de controle PID, Bioimpedância Elétrica e Tecnologias Assistivas. Atualmente é coordenador do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Paraná, campus de Paranavaí-PR.

VALDIRLEI FERNANDES FREITAS

Possui bacharelado (2006), mestrado (2009), doutorado (2011) e pós-doutorado (2013) em Física pela Universidade Estadual de Maringá. Atua principalmente no estudo de propriedades estruturais, magnéticas e elétricas de materiais multiferroicos. Atualmente é professor adjunto do Departamento de Física da Universidade Estadual do Centro-Oeste e membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Estadual de Maringá.

NAPI-EZC

Projeto financiado pela Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná – PI 05/2023 NAPI EZC

Novos Arranjos de Pesquisa e Inovação – Fundação Araucária

ENERGIAS ZERO CARBONO



Ilustrações: Canva
Capá: Freepik
Edição e adaptação das imagens: Viviane Guimarães



2024