

## DESVENDANDO OS HORIZONTES DA ENERGIA NUCLEAR: VISÃO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS

*SILVA, Ramon de Souza*<sup>1</sup>  
*Centro Universitário Academia – Uniacademia*  
*TEIXEIRA, Wesley Carminat*<sup>2</sup>  
*Centro Universitário Academia – Uniacademia*

Linha de pesquisa: Eficiência Energética

### RESUMO

Este estudo tem como propósito primordial realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre energia nuclear, englobando uma análise minuciosa das vantagens e desvantagens associadas a essa forma de energia. Será apresentado um histórico pormenorizado da utilização dessa fonte desde os seus primórdios até os dias atuais, enfatizando a sua importância na matriz energética global. Em seguida, serão examinadas as políticas nucleares dos principais países produtores, tais como China, Estados Unidos e França, juntamente com os seus planos para o futuro da energia nuclear e as estratégias adotadas para a sustentabilidade. Posteriormente, serão delineados os componentes essenciais de um reator nuclear, os princípios de funcionamento e as particularidades do processo de geração de eletricidade através da fissão nuclear. Por fim, o enfoque será direcionado ao Brasil, expondo o potencial nuclear nacional e a sua atual contribuição na geração de energia elétrica, com destaque para as regiões mais ativas nesse domínio.

**Palavras-chave:** Energia nuclear. Fissão nuclear. Fontes de energia. Eficiência energética.

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Academia - Uniacademia

<sup>2</sup> Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia - Uniacademia.

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda o tema da geração de energia nuclear e sua utilização no Brasil e no mundo, além de suas perspectivas de futuro. Será discutido o surgimento da energia nuclear como uma fonte de energia, os países líderes na geração nuclear, as características de suas matrizes energéticas, projeções futuras para a energia nuclear global e, por fim, uma análise detalhada do histórico, estado atual e potencial futuro da energia nuclear no Brasil, incluindo uma avaliação das vantagens e desvantagens associadas a essa forma de geração de energia.

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Desde suas descobertas fundamentais no século XX, a energia nuclear tem sido uma fonte de fascínio e controvérsia. Dentro desse contexto, ela surge como uma das formas de energia mais complexas e poderosas já conhecidas pela humanidade. A capacidade de liberar enormes quantidades de energia a partir de reações nucleares, seja na forma de fissão ou fusão, revolucionou nossa compreensão da natureza e abriu as portas para uma nova era de geração de eletricidade e aplicações tecnológicas. Nos últimos séculos, a humanidade testemunhou um progresso sem precedentes na busca por fontes de energia capazes de impulsionar seu desenvolvimento e proporcionar conforto e bem-estar à sociedade.

No entanto, a energia nuclear não é apenas uma fonte de energia, mas também um tópico de debate e preocupação global. As questões relacionadas à segurança, ao gerenciamento de resíduos radioativos, à proliferação nuclear e aos potenciais impactos ambientais têm sido objeto de intenso escrutínio e discussão ao longo dos anos.

Em resumo, o principal objetivo deste trabalho é explorar as características fundamentais da energia nuclear, disseminar o conhecimento sobre essa fonte energética e fornecer uma base informativa para futuras investigações e estudos sobre o tema. Além disso, por sua estrutura (apresentada a seguir) e conteúdo, esse trabalho se caracteriza como uma revisão bibliográfica.

## 1.2 ESTRUTURA DO ARTIGO

Na primeira seção, é apresentada a introdução, motivação e a estrutura do trabalho.

Na segunda seção, é fornecido um breve histórico da energia nuclear, desde suas primeiras aplicações até seu uso atual em usinas nucleares para geração de eletricidade.

Na terceira seção, é apresentada uma visão abrangente da energia nuclear no mundo. Começando com o histórico de sua utilização e crescimento ao longo dos anos, são detalhados os principais países produtores de energia nuclear, destacando-se os três principais produtores: Estados Unidos, França e China, incluindo suas matrizes energéticas, uso da energia nuclear e perspectivas futuras em relação a essa fonte.

A quarta seção oferece uma visão mais técnica do processo de geração de energia nuclear, explorando o funcionamento dos reatores nucleares e os componentes que os compõem.

A quinta seção aborda o cenário da energia nuclear no Brasil. Após uma análise do histórico de uso da energia nuclear, sua posição no contexto global e as tecnologias empregadas na geração nuclear, são discutidas as perspectivas futuras para o país nesse campo. Esta seção oferece uma visão detalhada do panorama atual da energia nuclear no Brasil.

Na sexta seção, são exploradas as vantagens e desvantagens da energia nuclear. Isso inclui considerações sobre acidentes nucleares da história, como Chernobyl (1986) na Ucrânia, ex-URSS e Fukushima Daiichi (2011) no Japão. Esta seção proporciona uma análise equilibrada dos aspectos positivos e negativos da energia nuclear.

Na sétima seção, o trabalho é concluído, mostrando as perspectivas futuras da energia nuclear, incluindo inovações tecnológicas, e como essas inovações podem impactar a produção de energia no futuro.

Por fim, na oitava seção, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas como base para a elaboração deste trabalho.

## 2 HISTÓRIA DA ENERGIA NUCLEAR

A energia nuclear é uma fonte de fascínio e inovação que se estende por séculos de exploração científica e desenvolvimento tecnológico. Desde os primeiros questionamentos sobre a estrutura do átomo pelos físicos do século XIX até os avanços revolucionários do século XX, a jornada da energia nuclear tem sido marcada por uma busca incessante pelo conhecimento e pelo poder que reside no núcleo atômico. Como ressalta Rhodes (1986), as raízes da energia nuclear podem ser rastreadas até as descobertas fundamentais de cientistas como Dalton, Thomson e Rutherford, que lançaram as bases para a compreensão da estrutura atômica. Além disso, Albert Einstein, em sua famosa equação  $E = mc^2$ <sup>3</sup>, estabeleceu a relação entre massa e energia, lançando as bases teóricas para o entendimento do potencial energético contido nos átomos. Einstein afirmou: "A descoberta da fissão nuclear é um acontecimento que mudará tudo." (Isaacson, 2007).

Entretanto, Rhodes (1986) destaca: "O verdadeiro marco na história da energia nuclear veio em 1938, quando os físicos Otto Hahn e Fritz Strassmann, na Alemanha, e Lise Meitner e Otto Frisch, na Suécia, realizaram experimentos que levaram à descoberta da fissão nuclear." A descoberta da fissão nuclear abriu caminho para o desenvolvimento do primeiro reator nuclear controlado em 1942. Este marco histórico ocorreu no laboratório de Chicago, conhecido como Chicago Pile-1, marcando o início da era nuclear e inaugurando uma nova era na geração de energia (Rhodes, 1986).

Após o término da Segunda Guerra Mundial, a energia nuclear emergiu como uma promissora fonte de energia para a reconstrução e desenvolvimento pós-guerra. Os avanços científicos e tecnológicos conquistados durante o conflito foram direcionados para aplicações pacíficas, e a construção das primeiras usinas nucleares para geração de eletricidade marcou um importante capítulo na história da energia nuclear. Este período pós-guerra testemunhou um rápido avanço na exploração da energia nuclear para fins civis. A energia nuclear foi explorada para fins pacíficos, com a construção das primeiras usinas nucleares para geração de eletricidade, refletindo

---

<sup>3</sup> E = energia, m = massa e c<sup>2</sup> = velocidade da luz ao quadrado. Sendo a velocidade da luz 300.000 km/s. Disponível em: <https://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/emcsup2sup-einstein-e-a-equivalencia-entre-materia-e-energia.htm>. Acesso em: 04 maio 2024.

a urgência e a determinação de utilizar os benefícios da energia nuclear para impulsionar o progresso econômico e social (Avory, 2012).

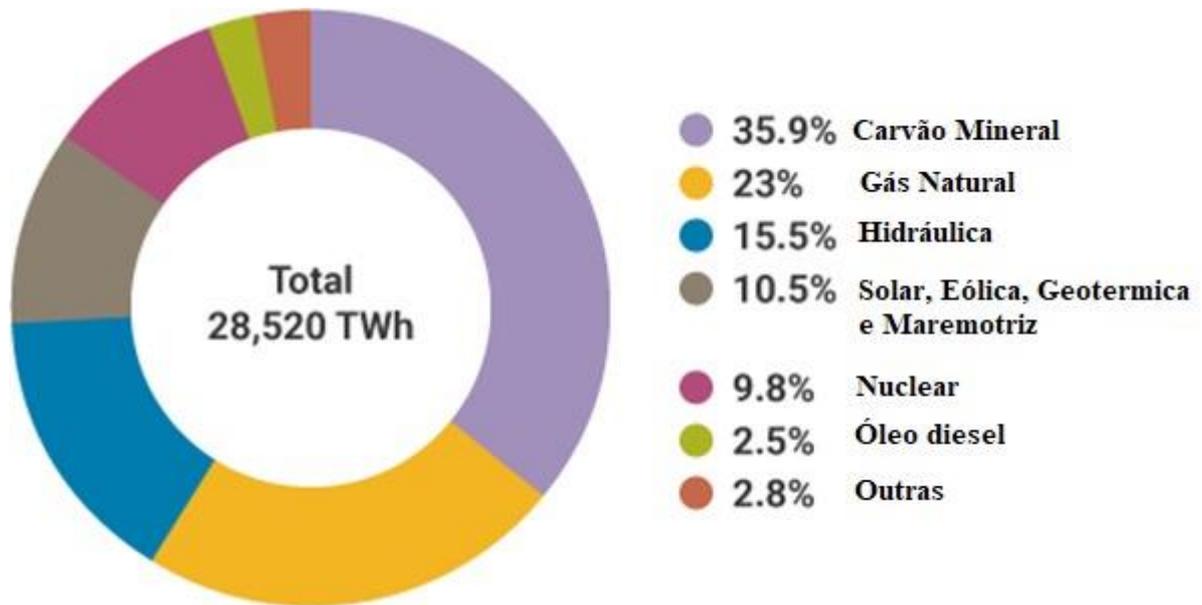
Esse período pós-guerra foi marcado por um clima de otimismo e esperança, onde a energia nuclear era vista como uma solução para as crescentes demandas por energia em um mundo em reconstrução. A construção de usinas nucleares representava não apenas uma fonte de energia limpa e abundante, mas também uma demonstração do domínio científico e tecnológico das nações que as desenvolviam. No entanto, esse otimismo inicial foi gradualmente acompanhado por preocupações crescentes sobre os desafios e os riscos associados ao uso da energia nuclear, incluindo questões de segurança, gestão de resíduos e proliferação nuclear.

Atualmente, a energia nuclear desempenha um papel crucial na matriz energética de numerosos países em todo o mundo. De acordo com dados recentes da Empresa de pesquisa Energética (EPE, 2023), mais de 440 reatores nucleares estão atualmente em operação em aproximadamente 30 países, contribuindo para a geração de aproximadamente 10-15% da eletricidade global. Esses números refletem a importância crescente da energia nuclear como uma fonte de energia estável e de baixa emissão de carbono em um cenário de mudanças climáticas e transição energética. Avanços tecnológicos e regulamentares têm aprimorado a segurança e eficiência das usinas nucleares, como destacado por Cohen (1990). Com o desenvolvimento contínuo de tecnologias nucleares avançadas e a implementação eficaz de medidas de segurança, a energia nuclear pode desempenhar um papel vital na mitigação das mudanças climáticas e na garantia de um fornecimento de energia confiável para as gerações futuras.

### **3 ENERGIA NUCLEAR NA MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL**

Como mencionado anteriormente, a energia nuclear vem desempenhando um papel significativo e de crescimento contínuo na produção de energia elétrica dentro da matriz energética mundial, sendo responsável por cerca de 10 a 15% do total global, conforme apresentado na Figura 1.

**Figura 1** - Produção mundial de eletricidade por fonte (TWh)

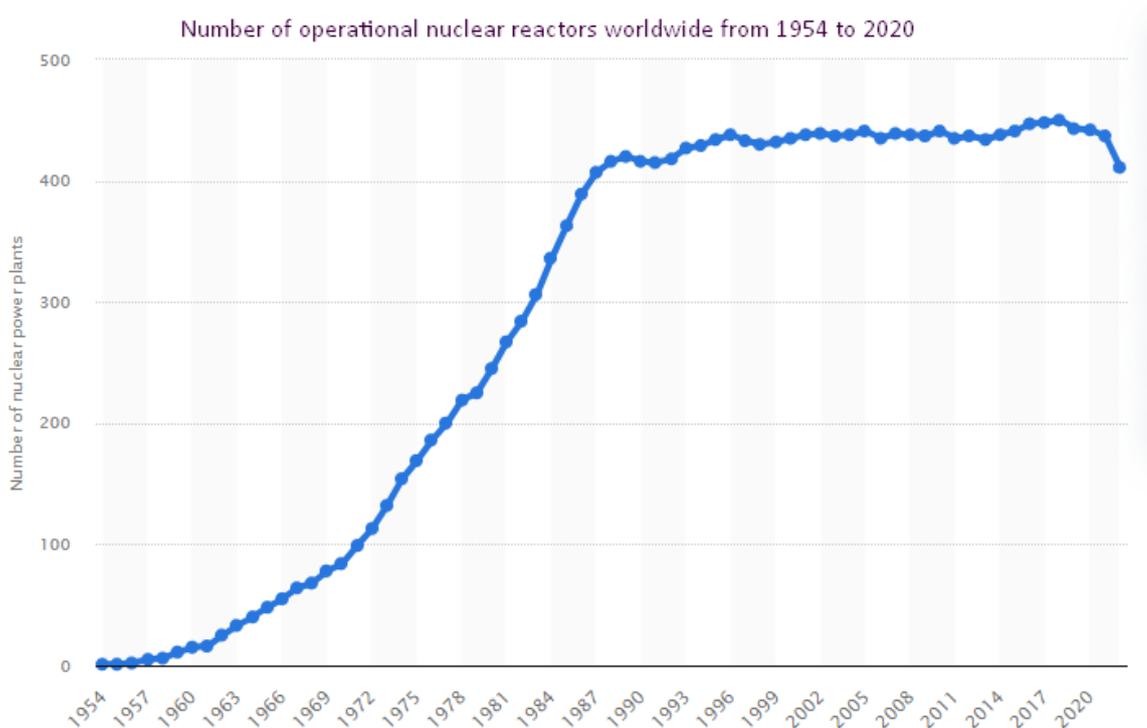


Fonte: IAEA (2022).<sup>4</sup> (Tradução da legenda feita pelo autor)

Esse crescimento contínuo da energia nuclear ao longo das décadas pode ser atribuído à evolução tecnológica e ao aprimoramento dos reatores nucleares, refletindo a busca incessante por tecnologias mais seguras e eficientes desde meados do século XX. Desde a inauguração do primeiro reator nuclear comercial em 1954, a energia nuclear tornou-se uma fonte crucial de energia em muitos países, impulsionando um aumento notável no número de reatores nucleares operacionais em todo o mundo, como mostra a Figura 2. Essas estruturas complexas, que aproveitam o poder da fissão nuclear para gerar eletricidade, têm desempenhado um papel significativo na matriz energética global, atendendo à crescente demanda por eletricidade e sustentando o interesse contínuo na energia nuclear como uma alternativa viável e confiável.

<sup>4</sup> Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today>. Acesso em: 04 maio 2024.

**Figura 2** - Histórico de desenvolvimento do total de instalações no mundo (GW)

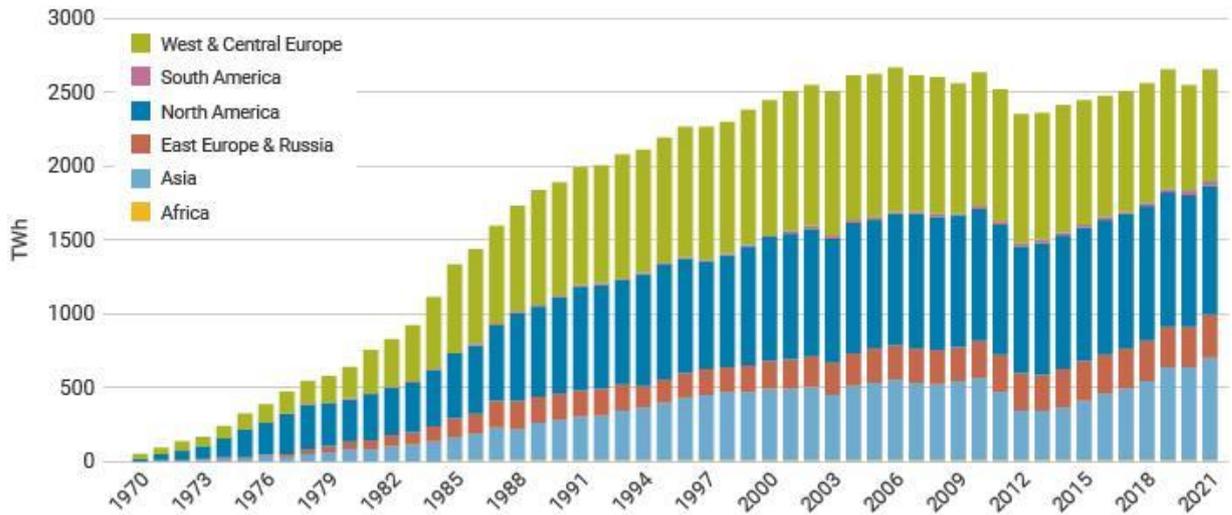


Fonte: Statista (2024).<sup>5</sup>

Algo de extrema importância para o futuro da geração de energia em qualquer lugar do mundo é o crescimento das instalações ao longo do tempo, conforme demonstrado na Figura 2. A demanda por energia nuclear está em constante crescimento, impulsionada pela necessidade crescente de fontes de energia limpas e confiáveis para atender ao aumento da demanda por eletricidade em todo o mundo. De acordo com dados da EPE (2023), a capacidade global de energia nuclear aumentou em cerca de 25% nos últimos 20 anos. Além disso, um relatório recente da *World Association of Nuclear Operators* (WANO) apontou que a produção de eletricidade nuclear aumentou em mais de 10% nos últimos cinco anos. Esses números destacam a crescente importância da energia nuclear na matriz energética global (Figura 3).

<sup>5</sup> Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/263945/number-of-nuclear-power-plants-worldwide/>. Acesso em: 04 maio 2024.

**Figura 3** – Produção de eletricidade nuclear de 1970 a 2022.



Fonte: *World Nuclear Association, IAEA PRIS (2022)*.<sup>6</sup>

Atualmente, os países com maior quantidade de instalações nucleares e maior capacidade de produção, conforme ilustrado na Figura 4, são EUA (96), França (58) e China (50).

<sup>6</sup> Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today>. Acesso em: 23 maio 2024.

**Figura 4** – Ranking de países com número de instalações e suas respectivas produções.

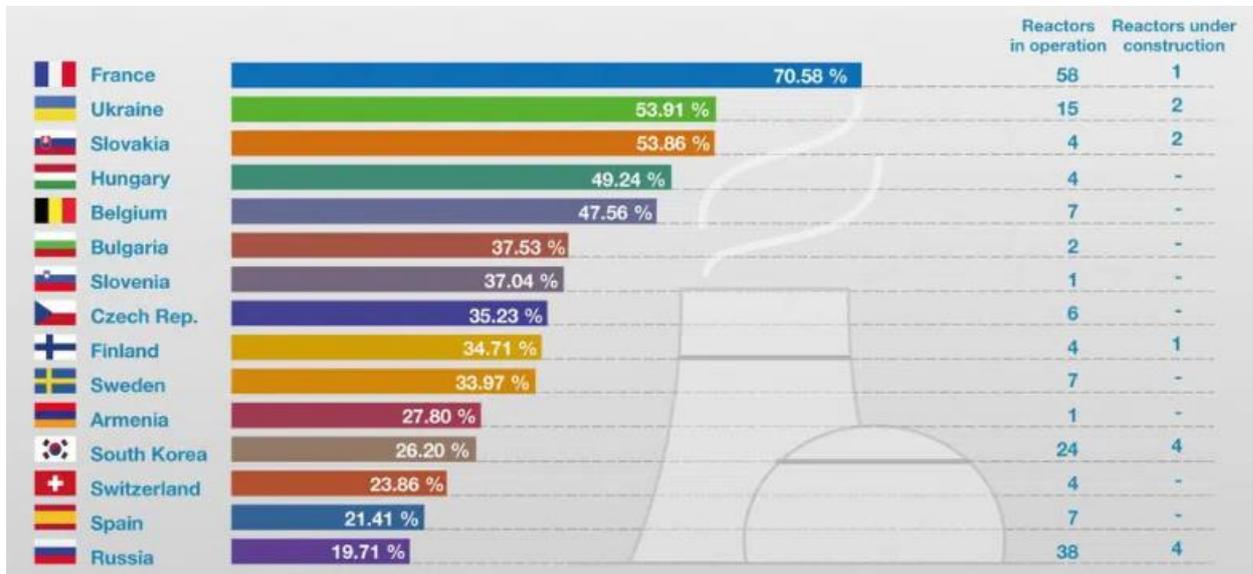
Rank	Country	Number of Operating Reactors	Nuclear Electricity Supplied [GWh]	% share
#1	U.S. 🇺🇸	96	789,919	30.9%
#2	China 🇨🇳	50	344,748	13.5%
#3	France 🇫🇷	58	338,671	13.3%
#4	Russia 🇷🇺	39	201,821	7.9%
#5	South Korea 🇰🇷	24	152,583	6.0%
#6	Canada 🇨🇦	19	92,166	3.6%
#7	Ukraine 🇺🇦	15	71,550	2.8%
#8	Germany 🇩🇪	6	60,918	2.4%
#9	Spain 🇪🇸	7	55,825	2.2%
#10	Sweden 🇸🇪	7	47,362	1.9%
#11	U.K. 🇬🇧	15	45,668	1.8%
#12	Japan 🇯🇵	33	43,099	1.7%
#13	India 🇮🇳	22	40,374	1.6%
#14	Belgium 🇧🇪	7	32,793	1.3%
#15	Czechia 🇨🇪	6	28,372	1.1%
	Rest of the World 🌍	44	207,340	8.1%
	<b>Total</b>	<b>448</b>	<b>2,553,208</b>	<b>100.0%</b>

Fonte: *Visual Capitalist* (2022).<sup>7</sup>

Porém, é importante destacar que há países que adotaram a energia nuclear como uma parte fundamental de suas matrizes energéticas, impulsionados por sua confiabilidade e contribuição para a redução das emissões de carbono. Nesse panorama, destacam-se França, Ucrânia e Eslováquia, como pode ser observado na Figura 5.

<sup>7</sup> Disponível em: <https://www.visualcapitalist.com/ranked-nuclear-power-production-by-country/>. Acesso em: 04 maio 2024.

**Figura 5** – Produção de eletricidade nuclear de 1970 a 2022.



Fonte: PRIS-OIEA, World Nuclear Association and Foro (2019).<sup>8</sup>

É relevante observar também que esses países podem apresentar diferentes níveis de dependência em relação à energia nuclear em suas matrizes energéticas, e que a capacidade instalada pode variar ao longo do tempo devido a desativações, construções de novas usinas ou atualizações tecnológicas. Essa dinâmica evidencia a complexidade e a evolução constante do panorama energético global.

### 3.1 OS MAIORES PRODUTORES DE ENERGIA NUCLEAR NO MUNDO

É notável que, ao contrário do Brasil, a matriz energética global depende predominantemente de combustíveis fósseis, com o gás natural e o carvão mineral liderando essa participação. De acordo com dados da EPE, em 2023, o carvão mineral representou cerca de 36% e o gás natural aproximadamente 23% da matriz elétrica mundial. Esses números destacam que mais da metade de toda a energia gerada no mundo é proveniente de fontes não renováveis. Em contraste, fontes renováveis, como solar, eólica, geotérmica, maremotriz e outras, contribuíram conjuntamente com apenas 10,5% da geração total de eletricidade.

<sup>8</sup> Disponível em: <https://earth.org/nuclear-energy-facts/>. Acesso em: 04 maio 2024.

Como ilustrado anteriormente na Figura 4, os países com maior quantidade de instalações nucleares e maior capacidade de produção são os Estados Unidos, França e China. Esses países desempenham um papel crucial na produção global de energia nuclear e contribuem para o fornecimento de eletricidade por meio dessa fonte.

### **3.1.1 Estados Unidos (EUA)**

O maior produtor de energia nuclear, os Estados Unidos, têm desempenhado um papel significativo na indústria nuclear desde o desenvolvimento das primeiras tecnologias nucleares. Durante a Guerra Fria, os Estados Unidos investiram fortemente na energia nuclear como parte de seus esforços para desenvolver armas nucleares e garantir a segurança nacional. Após a guerra, essa tecnologia foi adaptada para fins civis, levando à construção de numerosas usinas nucleares em todo o país. O país possui aproximadamente 93 reatores nucleares comerciais em operação, com uma capacidade instalada totalizando cerca de 98 gigawatts (GW) de energia nuclear. Em 2020, esses reatores produziram uma quantidade significativa de energia, totalizando aproximadamente 809 terawatt-horas (TWh) de eletricidade nuclear (IAEA, 2020).

Uma das usinas nucleares mais proeminentes nos Estados Unidos é a Usina Nuclear de Palo Verde, localizada no Arizona. Esta é a maior usina nuclear dos Estados Unidos em termos de capacidade de geração de eletricidade, gerando mais de 3.937 megawatts elétricos (MWe). A Usina Nuclear de Palo Verde possui três reatores nucleares em operação, e juntos eles contribuem significativamente para a produção de energia elétrica no sudoeste dos Estados Unidos. Devido à sua capacidade e eficiência, a Usina Nuclear de Palo Verde desempenha um papel crucial na matriz energética da região e é uma peça importante na infraestrutura de energia no país.

As usinas nucleares nos Estados Unidos são regulamentadas pela Comissão Reguladora Nuclear dos EUA (*Nuclear Regulatory Commission* - NRC). A NRC desempenha um papel fundamental na garantia da segurança e proteção ambiental relacionadas à energia nuclear. Ela estabelece requisitos rigorosos para todas as

fases do ciclo de vida das usinas nucleares, incluindo a construção, operação e desativação. Por meio de suas diretrizes e regulamentações, a NRC visa garantir a segurança das usinas nucleares, minimizar os riscos para o meio ambiente e proteger a saúde pública.

### 3.1.2 França

O segundo maior produtor de energia nuclear, a França, é um dos principais produtores de energia nuclear do mundo, com uma extensa infraestrutura de usinas nucleares. Possui aproximadamente 56 reatores nucleares comerciais em operação, com uma capacidade instalada totalizando cerca de 62 gigawatts (GW) de energia nuclear. Em 2020, esses reatores produziram uma quantidade significativa de energia, totalizando aproximadamente 378 terawatt-horas (TWh) de eletricidade nuclear (IAEA, 2020). Com uma longa história no desenvolvimento e implantação dessa tecnologia, o país tornou-se um dos líderes globais nesse setor, com a decisão estratégica de investir pesadamente na energia nuclear remontando aos anos 1970, quando a França enfrentava desafios energéticos significativos devido à sua dependência de importações de petróleo e gás natural. O país possui uma das maiores proporções de energia nuclear em sua matriz energética, com cerca de 70% de sua eletricidade sendo gerada a partir de usinas nucleares, conforme mostra a Figura 5.

Isso se deve em parte à implementação bem-sucedida de um programa nacional de energia nuclear (*Programme Électronucléaire Français*), que resultou na construção de uma extensa rede de usinas nucleares em todo o país. Uma das características marcantes do programa nuclear francês é a padronização e a eficiência na construção e operação das usinas nucleares. Isso permitiu à França estabelecer um alto nível de segurança e confiabilidade em suas instalações nucleares, o que contribuiu para a aceitação pública geral da energia nuclear no país.

Uma das muitas usinas nucleares que se destacam na França é a Usina Nuclear de Flamanville, localizada na comuna de Flamanville, no departamento de Manche, na região da Normandia. Segundo o Grupo EDF (2024), esta usina é notável por ser uma das maiores e mais recentes usinas nucleares em operação na França. Com capacidade geracional de 1.600 megawatts elétricos (MWe), ela é composta por

dois reatores de água pressurizada (PWR), com capacidade para gerar uma quantidade significativa de eletricidade para suprir a demanda energética do país.

As usinas nucleares na França são reguladas pela *Autorité de Sûreté Nucléaire* (ASN), ou Autoridade de Segurança Nuclear. A ASN desempenha um papel crucial na garantia da segurança e proteção ambiental associadas à energia nuclear. Ela estabelece diretrizes e regulamentações abrangentes para todas as fases do ciclo de vida das usinas nucleares, desde sua construção até a operação e eventual desativação. Através de suas normas rigorosas, a ASN busca garantir a segurança das usinas nucleares, minimizar os impactos ambientais e proteger a saúde pública, assegurando que as instalações nucleares na França atendam aos mais altos padrões de segurança e qualidade.

### **3.1.3 China**

O terceiro maior produtor de energia nuclear, a China, vem demonstrando um interesse crescente na energia nuclear como parte de sua estratégia energética. O país está rapidamente expandindo sua capacidade nuclear, construindo novas usinas nucleares e investindo em tecnologias nucleares avançadas. O país também está buscando aumentar sua participação na exportação de tecnologia nuclear, estabelecendo parcerias com outros países para o desenvolvimento conjunto de projetos nucleares e investindo em programas de pesquisa e desenvolvimento nuclear. Atualmente, o país possui cerca de 51 reatores nucleares comerciais em operação, com uma capacidade instalada totalizando aproximadamente 52 gigawatts (GW) de energia nuclear. Em 2020, esses reatores produziram uma quantidade significativa de energia, totalizando aproximadamente 370 terawatt-horas (TWh) de eletricidade nuclear (IAEA, 2020).

Segundo a CLP Power Hong Kong Limited (2024), a Usina Nuclear de Daya Bay, localizada na província de Guangdong, é uma peça central no cenário nuclear da China. Desde sua inauguração em 1994, esta usina tem sido uma fonte confiável e significativa de energia para o país. Composta por dois reatores de água pressurizada (PWR), ela tem uma capacidade instalada de aproximadamente 1.978 MWe, desempenhando um papel crucial no atendimento à crescente demanda por eletricidade na região. Além de sua importância como fonte de energia, a Usina

Nuclear de Daya Bay representa um marco no desenvolvimento do programa nuclear chinês, demonstrando a capacidade do país de implementar e operar com segurança instalações nucleares de grande porte.

Na China, a regulamentação das usinas nucleares é realizada pela Administração Nacional de Segurança Nuclear (*National Nuclear Safety Administration* - NNSA). A NNSA desempenha um papel crucial na supervisão e controle da segurança e proteção ambiental relacionadas à energia nuclear no país. Estabelecendo requisitos rigorosos em todas as etapas do ciclo de vida das usinas nucleares, desde sua construção até sua operação e eventual desativação, a NNSA visa garantir a segurança das instalações nucleares, minimizar os riscos ambientais e proteger a saúde pública. Por meio de suas diretrizes e regulamentações, a NNSA trabalha para promover práticas seguras e sustentáveis na indústria nuclear chinesa, assegurando a confiabilidade e eficiência das usinas nucleares em todo o país.

#### **4 FUNCIONAMENTO DA GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR**

Segundo o Ministério de Minas e Energia do Brasil (2007), "as usinas nucleares são semelhantes às usinas termelétricas convencionais em ciclo simples. Basicamente, o processo envolve o aquecimento de vapor a alta pressão que, ao expandir-se, aciona uma turbina térmica, movimentando um gerador elétrico acoplado a seu eixo."

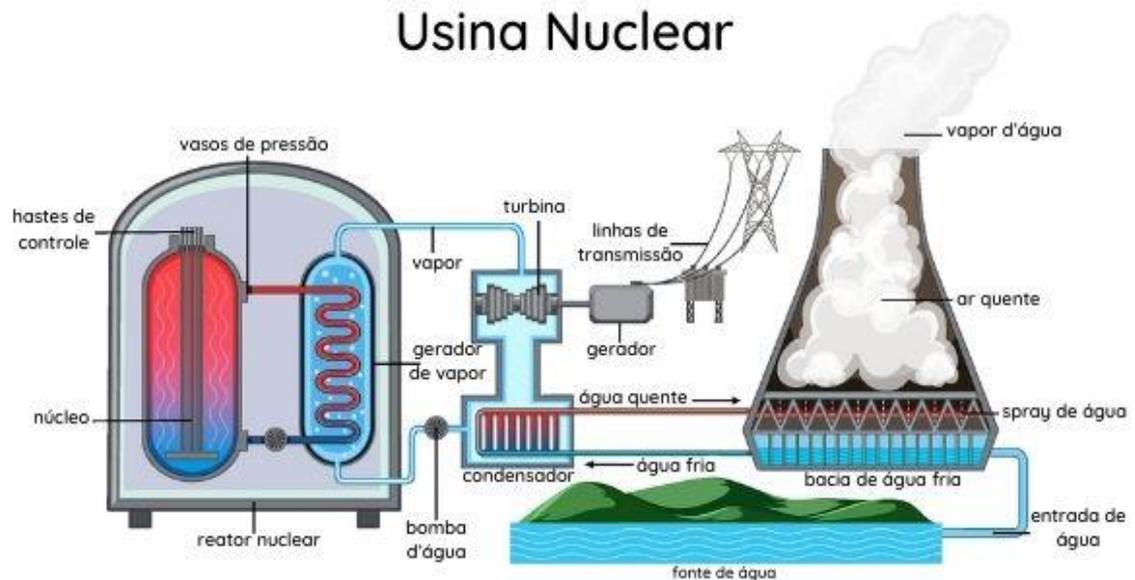
A energia nuclear é gerada por meio do processo de fissão nuclear, que ocorre nos reatores nucleares. Este processo não requer uma matéria-prima específica para sua geração, pois é baseado na instabilidade dos núcleos atômicos de certos elementos, como por exemplo o urânio-235, que ocorre naturalmente na natureza. Rhodes (1986) salienta que, "a fissão nuclear libera enormes quantidades de energia ao dividir o núcleo de um átomo, transformando matéria em energia utilizável para fins pacíficos". Essa fissão nuclear dispensa uma grande quantidade de energia na forma de calor, que é então utilizada para aquecer água e gerar vapor. Esse vapor aciona turbinas conectadas a geradores elétricos, convertendo a energia térmica em energia elétrica. A seguir, será explorado detalhadamente como o processo de fissão nuclear é aproveitado para a geração de energia elétrica.

#### 4.1 COMPONENTES DE UMA USINA NUCLEAR

O reator nuclear é o núcleo do processo de geração de energia nuclear. Este dispositivo é responsável por abrigar e controlar as reações nucleares que ocorrem durante o processo de fissão nuclear. Os reatores nucleares são peças fundamentais da infraestrutura energética, onde as reações nucleares são cuidadosamente controladas para garantir uma produção estável de eletricidade (Johnson, 2023). Embora o reator nuclear seja composto por uma variedade de componentes essenciais, o elemento central é o núcleo do reator, onde as reações de fissão nuclear ocorrem. É nesse local que o urânio-235 é bombardeado por nêutrons, resultando na liberação de energia na forma de calor.

Além do núcleo do reator, outros componentes são igualmente cruciais para o funcionamento adequado do sistema nuclear. Entre esses componentes, destacam-se o sistema de refrigeração, responsável por controlar a temperatura do reator e garantir sua operação segura, e os sistemas de controle e segurança, que monitoram e regulam as reações nucleares dentro do reator. Cada componente desempenha um papel vital no processo de geração de energia nuclear, assegurando não apenas a eficiência, mas também a segurança e a estabilidade do sistema como um todo (Figura 6).

**Figura 6** – Processos e componentes de uma usina nuclear



Fonte: Brasil Escola (2024).<sup>9</sup>

Detalhando cada um dos processos e seus componentes (Nuclear-Power, 2024):

- Núcleo do reator: O núcleo do reator é o coração de um reator nuclear, onde ocorrem as reações nucleares de fissão. Ele contém o combustível nuclear, que geralmente é composto por pellets de óxido de urânio enriquecido ou outros materiais fissíveis. Os nêutrons liberados durante a fissão são utilizados para iniciar e manter a reação em cadeia.
- Moderador: O moderador é responsável por desacelerar os nêutrons rápidos produzidos durante a fissão, aumentando assim a probabilidade de interação desses nêutrons com outros núcleos fissíveis. Os moderadores mais comuns são a água leve (H<sub>2</sub>O) e o grafite, que desaceleram os nêutrons sem absorvê-los significativamente.

<sup>9</sup> Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/como-funciona-uma-usina-nuclear.htm#:~:text=A%20energia%20dos%20reatores%20nucleares,is%C3%B3topos%20f%C3%ADsseis%20ou%20is%C3%B3topos%20f%C3%A9rteis>. Acesso em: 04 maio 2024.

- **Refrigerante:** O refrigerante é utilizado para transferir o calor gerado no núcleo do reator para um sistema de geração de energia. O refrigerante pode ser água, que é comumente usada em reatores de água pressurizada (PWRs) e reatores de água fervente (BWRs), ou pode ser um gás, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), usado em reatores de grafite-gás.
- **Vasos de pressão e tubos:** O núcleo do reator, o moderador e o refrigerante são contidos em um vaso de pressão robusto, geralmente feito de aço especial, que é projetado para suportar altas temperaturas e pressões. Tubos e canais são usados para transportar o refrigerante do núcleo do reator para o sistema de troca de calor.
- **Sistema de controle de reatividade:** Este sistema é composto por hastes ou barras de controle, geralmente feitas de materiais absorvedores de nêutrons, como o cádmio ou o boro. Essas hastes são inseridas no núcleo do reator para regular a taxa de reação nuclear, controlando assim a produção de calor e a potência do reator.

#### 4.2 TIPOS DE REATORES NUCLEARES

Desde o início da era nuclear, os reatores nucleares têm desempenhado um papel fundamental na geração de eletricidade e no impulsionamento de uma série de aplicações industriais, médicas e científicas. Ao longo das décadas, uma variedade de tipos de reatores foram desenvolvidos e implementados, cada um com suas próprias características, vantagens e desafios. Os principais tipos de reatores nucleares utilizados hoje em dia são os seguintes:

- **Reatores de Água Leve (LWR - Light Water Reactors):** Estes são os reatores mais comuns e amplamente utilizados em todo o mundo para a produção comercial de energia nuclear. Existem dois tipos principais de LWR: reatores de água pressurizada (PWR) e reatores de água fervente (BWR) (Energia Nuclear, 2024).
- **Reatores de Água Pesada (HWR - Heavy Water Reactors):** Embora menos comuns do que os LWRs, os reatores de água pesada são usados em vários

países, como Canadá e Índia. Eles utilizam água pesada (deutério) como moderador e refrigerante (Energia Nuclear, 2024).

- **Reatores de Grafite Moderado a Gás:** Esses reatores foram usados historicamente no Reino Unido e em outros países, mas sua utilização comercial diminuiu ao longo do tempo. Eles empregam grafite como moderador e dióxido de carbono como refrigerante (Thermopedia, 2024).
- **Reatores de Água Leve Moderados a Grafite (RBMK):** Embora não sejam mais construídos, os reatores RBMK eram usados na antiga União Soviética. Eles usavam grafite como moderador e água leve como refrigerante (Energy Education, 2024).
- **Reatores de Água em Ebulição Avançada (ABWR - Advanced Boiling Water Reactors):** Estes são uma versão avançada dos reatores de água fervente e incorporam tecnologias mais recentes para melhorar a segurança e a eficiência (NRC, 2024).

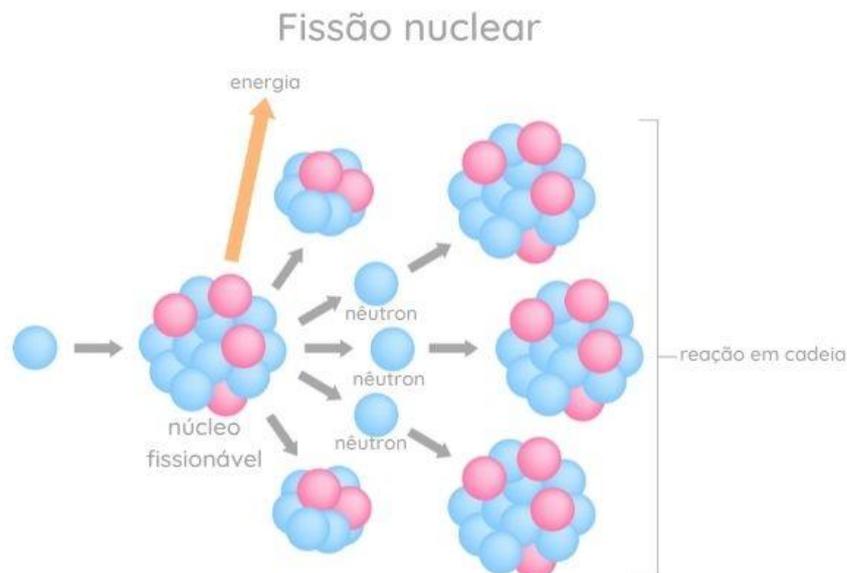
Pode-se ainda destacar que dentre os avanços mais promissores está a categoria dos reatores de geração IV, que representam uma nova geração de sistemas nucleares projetados para enfrentar os desafios do século XXI. Esses reatores, que incluem designs inovadores como os reatores de fissão rápida, reatores de leito fluidizado e reatores de sal fundido, oferecem potencial para maior segurança, redução de resíduos nucleares e flexibilidade de combustível. Com investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, os reatores de geração IV têm o potencial de revolucionar a indústria nuclear e contribuir significativamente para um futuro energético mais limpo e sustentável.

#### 4.3 CONVERSÃO DE ENERGIA DA FISSÃO NUCLEAR EM ELETRICIDADE

No centro da geração de energia nuclear reside o fenômeno complexo da fissão nuclear. Esse processo fundamental, conforme elucidado pelos princípios nucleares, é desencadeado quando um nêutron, vagando pelo núcleo atômico, colide com um átomo instável, como o urânio-235. Conforme destacado no Plano Nacional de Energia – PNE 2030, "no interior do reator se dá a reação de fissão dos átomos

do  $U^{235}$ , iniciada com o bombardeio de nêutrons. Cada átomo que se fissiona emite 2 ou 3 nêutrons, gerando a reação em cadeia". Nesse momento, ocorre uma reação extraordinária, resultando na divisão do núcleo em dois fragmentos menores. A energia liberada durante esse processo é imensa, liberando-se na forma de calor. Além disso, múltiplos nêutrons são emitidos como produtos secundários. Esses nêutrons, por sua vez, podem encontrar novos núcleos instáveis, desencadeando reações subsequentes em uma cadeia contínua, resultando em uma cascata de eventos nucleares, como podemos observar na Figura 7. Este fenômeno é o cerne do funcionamento dos reatores nucleares, onde a fissão controlada é utilizada para aquecer a água e produzir vapor, que por sua vez aciona turbinas para gerar eletricidade. É crucial destacar que esse processo é meticulosamente controlado dentro de um reator nuclear, visando não apenas garantir uma produção estável de energia, mas também assegurar a segurança e a integridade do sistema como um todo.

**Figura 7** – Processos e componentes de uma usina nuclear



Fonte: Brasil Escola (2024).<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/como-funciona-uma-usina-nuclear.htm#:~:text=A%20energia%20dos%20reatores%20nucleares,is%C3%B3topos%20f%C3%ADsseis%20ou%20is%C3%B3topos%20f%C3%A9rteis>. Acesso em: 04 maio 2024.

#### 4.4 OS COMBUSTÍVEIS NUCLEARES

A energia nuclear, como discutido anteriormente, é gerada por meio de reações nucleares que ocorrem dentro de reatores nucleares. Essas reações normalmente envolvem a fissão nuclear, na qual núcleos atômicos pesados, como o urânio-235, são bombardeados por nêutrons, resultando na quebra do núcleo em fragmentos menores e na liberação de uma grande quantidade de energia na forma de calor. Nesse contexto, as fontes de combustível desempenham um papel fundamental na geração de energia nuclear, fornecendo o material necessário para alimentar os reatores nucleares e gerar eletricidade. Conforme mencionado por Johnson (2023) em seu estudo sobre energia nuclear, "as fontes de combustível são essenciais para manter o funcionamento dos reatores nucleares, sendo o urânio-235 uma das principais fontes utilizadas devido à sua capacidade de sustentar reações em cadeia." As principais fontes incluem (IAEA, 2024):

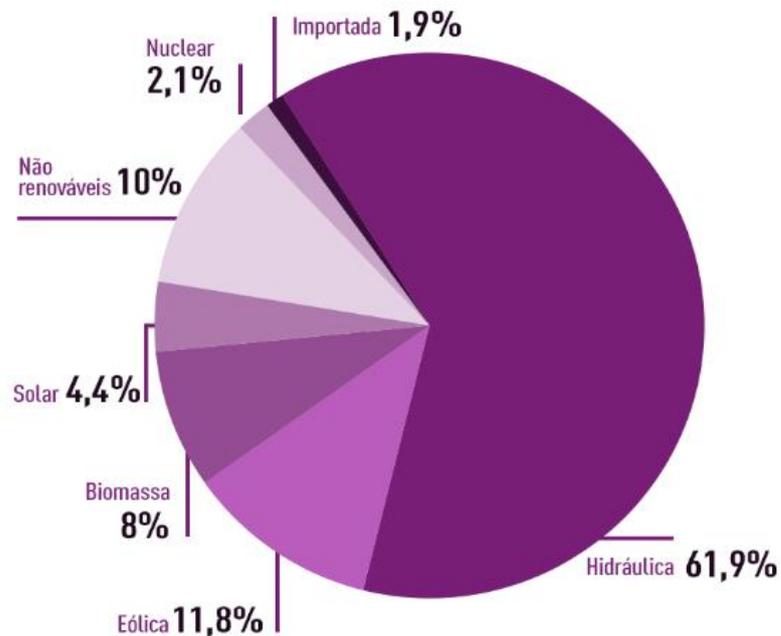
- **Urânio-235 (U-235):** O urânio-235 é o combustível mais comum e amplamente utilizado em reatores nucleares. É um isótopo naturalmente ocorrente do urânio, representando apenas cerca de 0,7% do urânio encontrado na natureza. No entanto, é altamente valorizado devido à sua capacidade de sustentar uma reação em cadeia nuclear.
- **Urânio-238 (U-238):** O urânio-238 é outro isótopo do urânio encontrado na natureza, representando a maior parte do urânio natural. Embora não seja tão eficaz quanto o urânio-235 na sustentação de uma reação nuclear, pode ser convertido em plutônio-239 por meio de processos de transmutação, como a captura de nêutrons.
- **Plutônio-239 (Pu-239):** O plutônio-239 é um subproduto da fissão do urânio-235 e também pode ser produzido a partir do bombardeio de urânio-238 por nêutrons em um reator nuclear. Ele é amplamente utilizado como combustível em reatores de água leve e como material para armas nucleares.
- **Tório-232 (Th-232):** Embora menos comum do que o urânio, o tório-232 é outro elemento que pode ser utilizado como combustível em reatores

nucleares. O tório-232 pode ser convertido em urânio-233 por meio de processos de transmutação, como a captura de nêutrons, e então usado como combustível em reatores nucleares de tório.

As fontes de combustível desempenham um papel crucial na geração de energia nuclear, fornecendo os materiais necessários para alimentar os reatores nucleares e gerar eletricidade. A variedade de opções disponíveis oferece às usinas nucleares a flexibilidade de escolher o combustível mais adequado para suas necessidades específicas. A compreensão dessas fontes de combustível é fundamental para o desenvolvimento e aprimoramento da energia nuclear como uma fonte segura, confiável e sustentável de eletricidade. Além disso, Brown (2022), em sua pesquisa sobre física de partículas, ressalta que "A escolha da fonte de combustível pode impactar diretamente a eficiência e a segurança dos reatores nucleares, tornando crucial a seleção de materiais adequados para garantir o funcionamento confiável dessas instalações."

## **5 A ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL**

A história da energia nuclear no Brasil está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento das demais fontes de energia do país. Desde o início do século XX, o Brasil vem explorando uma variedade de fontes de energia para atender às suas crescentes demandas por eletricidade e combustíveis. Inicialmente, a energia hidrelétrica desempenhou e vem desempenhando um papel dominante na matriz energética brasileira, como mostrado no gráfico da Figura 8, aproveitando os abundantes recursos hídricos do país para gerar eletricidade (Oliveira, 2015). No entanto, à medida que a demanda por energia continuou a crescer e as preocupações com a segurança energética e as mudanças climáticas aumentaram, o Brasil começou a diversificar suas fontes de energia. Segundo Silva (2008), "a energia nuclear possui tecnologia capaz de oferecer uma fonte de energia inesgotável cujo fornecimento pode reduzir a poluição ambiental e os volumes de rejeitos que necessitam gerenciamento, incluindo as emissões de gases do efeito estufa".

**Figura 8 – Matriz Energética Brasileira**

Fonte: Balanço Energético Nacional 2023.<sup>11</sup>

### 5.1 AS PRIMEIRAS INICIATIVAS E CONSTRUÇÃO DE ANGRA 1

O interesse do Brasil na energia nuclear remonta aos anos 50, com a criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em 1956 (Cabral, 2011). No entanto, foi somente na década de 1970 que o país começou a construir sua primeira usina nuclear comercial, Angra 1. Localizada em Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro, Angra 1 entrou em operação em 1982, marcando o início da produção comercial de energia nuclear no Brasil (Silva, 2008). Esta fase inicial foi marcada por desafios técnicos e financeiros, mas também por conquistas significativas no desenvolvimento da infraestrutura nuclear do país.

<sup>11</sup> Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/matriz-energetica-brasileira/>. Acesso em: 04 maio 2024.

**Figura 9** - Complexo das usinas nucleares Angra 1 e Angra 2



Fonte: Agência O Globo (2018).<sup>12</sup>

## 5.2 EXPANSÃO COM ANGRA 2 E OS DESAFIOS DE ANGRA 3

Impulsionado pelo sucesso de Angra 1, o Brasil embarcou em um programa de expansão nuclear que incluiu a construção de mais duas usinas nucleares em Angra dos Reis. Angra 2 entrou em operação em 2000, aumentando a capacidade de geração de energia nuclear do país (Oliveira, 2015). No entanto, a construção de Angra 3 enfrentou uma série de desafios, incluindo questões financeiras, regulatórias e de segurança. Iniciada na década de 1980, a usina teve sua construção interrompida e reiniciada várias vezes ao longo dos anos. Atualmente, Angra 3 ainda está em construção, com previsão de conclusão nos próximos anos.

---

<sup>12</sup> Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/brasil-aumenta-em-25-capacidade-de-enriquecimento-do-uranio-23024763>. Acesso em: 04 maio 2024.

### 5.3 FUTURO DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL

O Brasil tem uma história notável no desenvolvimento e na utilização da energia nuclear, com marcos significativos como as usinas de Angra dos Reis. A retomada da construção da Usina Nuclear Angra 3 representa um sinal positivo das perspectivas futuras dessa fonte de energia no país. Além disso, o avanço tecnológico e a pesquisa contínua oferecem a possibilidade de desenvolver reatores mais seguros, eficientes e sustentáveis.

Outro ponto relevante é que o Brasil detém atualmente a oitava maior reserva de urânio do mundo, com cerca de 280.000 toneladas. No entanto, há potencial para estar entre os cinco maiores detentores globais. O Serviço Geológico do Brasil (SGB) desempenha um papel fundamental na identificação e avaliação das reservas brasileiras, bem como na análise de desafios e alternativas para a produção nacional de urânio, fornecendo informações cruciais para a gestão estratégica da Política Nuclear Brasileira (IPEN, 2024).

Apesar das perspectivas promissoras, a energia nuclear no Brasil enfrenta uma série de desafios significativos. Questões relacionadas à segurança, gestão de resíduos nucleares, regulação e aceitação pública representam obstáculos importantes para o desenvolvimento e expansão desse setor. Em seu artigo "Desafios e Oportunidades para a Energia Nuclear no Brasil" (Santos; Oliveira, 2018), destacam a necessidade de abordar essas questões de forma abrangente e integrada, envolvendo diferentes atores e setores da sociedade. Além disso, o financiamento e os custos associados à construção e operação de usinas nucleares são considerações importantes a serem enfrentadas.

Em resumo, o futuro da energia nuclear no Brasil é caracterizado por perspectivas promissoras, mas também por desafios complexos e multifacetados. Investimentos contínuos em pesquisa, desenvolvimento e infraestrutura são essenciais para fortalecer o setor nuclear brasileiro e garantir sua contribuição efetiva para a segurança energética e o desenvolvimento sustentável do país. Ao enfrentar os desafios existentes com determinação e cooperação, o Brasil pode aproveitar todo o potencial da energia nuclear e consolidar sua posição como um ator relevante no cenário nuclear global.

## 6 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA NUCLEAR

A energia nuclear tem sido objeto de intenso debate e análise devido às suas potenciais vantagens e desvantagens. Como uma fonte de energia altamente concentrada e capaz de gerar grandes quantidades de eletricidade de forma contínua, a energia nuclear tem sido considerada uma alternativa viável para atender às crescentes demandas energéticas em muitos países. No entanto, questões relacionadas à segurança, gerenciamento de resíduos radioativos, proliferação nuclear e custos associados ainda geram preocupações significativas. Neste contexto, é essencial examinar de perto as vantagens e desvantagens da energia nuclear para uma compreensão abrangente de seu papel no panorama energético global.

### 6.1 VANTAGENS

- **Baixas Emissões de Carbono:** A energia nuclear é elogiada por sua capacidade de gerar eletricidade com baixas emissões de gases de efeito estufa, contribuindo assim para a mitigação das mudanças climáticas. Como observado por Cohen (1990), "a energia nuclear produz quantidades significativamente menores de gases de efeito estufa em comparação com fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis".
- **Alta Capacidade Energética:** Os reatores nucleares têm uma alta capacidade de produção de eletricidade, garantindo assim um fornecimento estável e confiável de energia. Como mencionado por Bodansky (2007), "os reatores nucleares podem fornecer uma quantidade significativa de eletricidade de forma consistente, contribuindo para atender à demanda crescente por energia".
- **Segurança Energética:** A energia nuclear reduz a dependência de fontes de energia importadas, promovendo assim a segurança energética dos países. A diversificação da matriz energética com energia nuclear pode ajudar os países a reduzirem sua vulnerabilidade a interrupções no fornecimento de energia (Lamarsh, 2001).
- **Baixo Custo Operacional:** Apesar dos altos custos de construção, os reatores nucleares têm custos operacionais relativamente baixos a longo prazo, o que

os torna economicamente viáveis. Como apontado por Hore-Lacy (2012), "os custos de operação dos reatores nucleares são competitivos em comparação com outras fontes de energia, como carvão e gás natural".

- **Contribuição para o Desenvolvimento Tecnológico:** A energia nuclear impulsiona o desenvolvimento de tecnologias avançadas e inovações em diversas áreas, como medicina, ciência dos materiais e propulsão espacial. Como destacado por Mahaffey (2014), "a pesquisa e o desenvolvimento em energia nuclear têm implicações amplas e profundas além da geração de eletricidade".

## 6.2 DESVANTAGENS

- **Gerenciamento de Resíduos:** Um dos principais desafios da energia nuclear é o gerenciamento seguro e a longo prazo dos resíduos radioativos produzidos durante o processo de fissão nuclear. O armazenamento e o descarte de resíduos nucleares permanecem como preocupações ambientais e de saúde pública não resolvidas. (Barnaby, 2004)
- **Proliferação Nuclear:** A disseminação de tecnologia nuclear para a geração de energia também aumenta o risco de proliferação de armas nucleares. Conforme destacado por Sagan (2012), "a expansão do acesso à tecnologia nuclear pode facilitar o desenvolvimento de armas nucleares por países ou grupos não estatais".
- **Alto Custo de Construção:** Os altos custos de construção de instalações nucleares podem representar um obstáculo significativo para a expansão da energia nuclear. Como observado por Joskow (2006), "os investimentos iniciais em novos reatores nucleares são substanciais e podem representar um risco financeiro para investidores e governos".
- **Vulnerabilidade a Ataques Terroristas:** As instalações nucleares representam alvos potenciais para ataques terroristas, o que levanta preocupações sobre a segurança nuclear. Como ressaltado por Matthew (2005), "a segurança das instalações nucleares é uma preocupação crítica, dada a possibilidade de que

materiais nucleares possam ser utilizados por terroristas para fabricar armas improvisadas".

- **Riscos de Acidentes Graves:** A energia nuclear apresenta o risco de acidentes graves, com potenciais consequências catastróficas para o meio ambiente e para a saúde humana. Como mencionado por Weart (2012), "os acidentes nucleares, como os de Chernobyl e Fukushima, ressaltam os perigos associados à operação de instalações nucleares".

### **6.2.1 Chernobyl**

O acidente na usina nuclear de Chernobyl, ocorrido em abril de 1986, é considerado um dos piores desastres nucleares da história (Plokhy, 2018). Desencadeado por uma série de erros humanos e falhas de projeto durante um teste de segurança, o reator nuclear explodiu, liberando uma enorme quantidade de material radioativo para a atmosfera. O desastre teve consequências catastróficas, incluindo a contaminação radioativa de vastas áreas ao redor da usina, evacuação forçada de milhares de pessoas, impactos na saúde pública e danos ambientais de longo prazo. Quase 36 anos após o acidente, os efeitos ainda são sentidos, com muitas áreas permanecendo inabitáveis e enfrentando desafios significativos de descontaminação. Além disso, o incidente aumentou as preocupações globais sobre a segurança das instalações nucleares e influenciou a política energética mundial, destacando a importância de rigorosos padrões de segurança em todas as etapas do ciclo nuclear (Plokhy, 2018).

Serhii Plokhy (2018) detalha os eventos que levaram à explosão do reator nuclear e suas consequências políticas, sociais e ambientais. Ele destaca ainda os perigos inerentes à tecnologia nuclear e a necessidade urgente de medidas para prevenir futuros incidentes semelhantes.

Além disso, Brown (2019) oferece uma análise profunda das consequências do desastre, destacando as falhas no tratamento dos impactos na saúde pública e na segurança alimentar das comunidades afetadas. Suas análises ressaltam a complexidade dos desafios enfrentados após o acidente de Chernobyl e a importância de uma abordagem abrangente para garantir a segurança e proteção das

comunidades em torno das instalações nucleares, bem como lidar com os impactos de longo prazo da radiação nuclear.

### **6.2.2 Fukushima**

O acidente na usina nuclear de Fukushima, ocorrido em março de 2011, assim como em Chernobyl, foi um dos mais graves desastres nucleares da história, desencadeado por um terremoto seguido por um tsunami. Resultou na perda de controle dos reatores nucleares, levando a múltiplos derretimentos nucleares e liberação de material radioativo para o meio ambiente. As consequências foram devastadoras, incluindo a evacuação de milhares de pessoas da região, contaminação ambiental, impactos na saúde pública e sérias preocupações sobre a segurança das instalações nucleares. Segundo Mahaffey (2014), o desastre de Fukushima destacou os perigos associados à operação de instalações nucleares. Quase 11 anos após o desastre, os esforços de descontaminação e recuperação continuam na região, embora muitas áreas ainda permaneçam inabitáveis devido à contaminação radioativa. O incidente também influenciou significativamente a política energética global, levando muitos países a revisarem seus planos de energia nuclear e a adotarem medidas adicionais de segurança.

De acordo com Sagan (2012), a expansão do acesso à tecnologia nuclear pode facilitar o desenvolvimento de armas nucleares por países ou grupos não estatais. O debate sobre os riscos e benefícios associados à energia nuclear foi reacendido, influenciando as discussões sobre a transição energética e o papel das fontes de energia na mitigação das mudanças climáticas.

A análise das vantagens e desvantagens da energia nuclear, juntamente com os impactos dos desastres nucleares em Chernobyl e Fukushima, destaca a complexidade e os desafios associados a essa fonte de energia. Embora a energia nuclear ofereça benefícios significativos, como baixas emissões de carbono, alta capacidade energética e contribuição para o desenvolvimento tecnológico, ela também apresenta desafios importantes, como o gerenciamento de resíduos, os riscos de proliferação nuclear e os custos elevados de construção. Os desastres nucleares em Chernobyl e Fukushima são lembretes sombrios dos perigos associados à energia nuclear, destacando a importância de rigorosos padrões de segurança e

regulamentações em todas as etapas do ciclo nuclear. No entanto, esses incidentes também estimularam a reflexão sobre a necessidade de uma transição energética para fontes mais seguras e sustentáveis. À medida que avançamos, é essencial aprender com os erros do passado e buscar soluções que equilibrem a necessidade de energia com a proteção da saúde humana e do meio ambiente.

## **7 PERSPECTIVAS FUTURAS**

À medida que o mundo enfrenta desafios cada vez mais complexos, como mudança climática, segurança energética e transição para uma economia de baixo carbono, a energia nuclear surge como uma peça fundamental no quebra-cabeça da matriz energética global. As perspectivas futuras para a energia nuclear são marcadas por uma intersecção de desafios e oportunidades, à medida que a comunidade internacional procura equilibrar a necessidade de uma fonte de energia confiável e de baixo carbono com preocupações sobre segurança, proliferação nuclear, gestão de resíduos e aceitação pública.

Atualmente, diversos reatores nucleares estão em operação ao redor do mundo, incluindo reatores de água pressurizada (PWR), reatores de água fervente (BWR) e outros reatores de água leve. Além disso, projetos de reatores em desenvolvimento estão buscando promover a próxima geração de tecnologia nuclear, como os reatores modulares avançados (SMRs), que oferecem benefícios em termos de custo, segurança e flexibilidade (Ferguson, 2019). Outras iniciativas incluem o desenvolvimento de reatores de quarta geração, como os reatores de nêutrons rápidos refrigerados a sódio (SFRs) e os reatores de geração IV baseados em combustível de tório.

Além disso, as pesquisas em fusão nuclear têm ganhado destaque como uma potencial fonte de energia limpa e praticamente ilimitada. Diferentemente da fissão nuclear, onde núcleos pesados são divididos, na fusão, núcleos leves são unidos, liberando uma grande quantidade de energia (Mulder, 2019). Os desafios incluem alcançar temperaturas extremamente altas e confinar o plasma resultante. Projetos como o ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) buscam demonstrar a viabilidade técnica da fusão. Comparada à fissão, a fusão oferece vantagens, como abundância de matéria-prima, produção mínima de resíduos nucleares e risco

reduzido de acidentes e proliferação nuclear. Embora ainda existam obstáculos a superar, o potencial da fusão nuclear para fornecer uma fonte de energia limpa e segura torna-a uma área promissora para o futuro energético global.

Vale destacar, ainda, a controvérsia em relação à energia nuclear ser considerada uma energia limpa, conforme citado por Pereira (2001):

A promessa da indústria nuclear de dar sustentação à demanda mundial de energia sem se desdobrar em impactos negativos sobre o clima do planeta tem sustentação científica. Mas daí a ser considerada energia limpa, soa tão inverossímil quanto a promessa de energia barata e inesgotável em que se apresentou ao mundo décadas atrás. Primeiro, porque a questão do lixo atômico produzido por essa indústria ainda está por ser equacionada, uma vez que sequer tem-se experiência com um único depósito definitivo de material radioativo. Depois, porque o desvio de material radioativo altamente concentrado não é matéria de ficção, podendo constituir-se em um dos mais novos e altos riscos à vida na Terra. Por tudo isso, a promessa de energia limpa, slogan recentemente adotado pela indústria nuclear deve ser visto com prudência, uma vez que, se por um lado a geração de eletricidade por fonte físsil não libera CO<sub>2</sub> para a atmosfera, por outro, introduz radiação ionizante no meio ambiente. (Pereira, 2001)

No entanto, para que essas inovações se tornem uma realidade e a energia nuclear desempenhe um papel significativo no futuro energético global, é crucial enfrentar os desafios existentes. Isso inclui a necessidade de avançar em tecnologias de segurança, desenvolver soluções para o gerenciamento de resíduos nucleares e fortalecer os regimes de não proliferação nuclear para evitar o uso indevido de materiais nucleares. Além disso, é fundamental continuar engajando o público de maneira transparente e informativa sobre os benefícios e riscos da energia nuclear, bem como abordar preocupações legítimas sobre segurança e meio ambiente.

As perspectivas futuras para a energia nuclear são promissoras, mas também desafiadoras. Com investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, avanços tecnológicos e um compromisso renovado com a segurança e a sustentabilidade, a energia nuclear pode desempenhar um papel crucial na transição para um futuro energético mais limpo, seguro e resiliente.

## **8 CONCLUSÃO**

Após explorar as diversas facetas da energia nuclear ao longo deste trabalho, desde seus primórdios até suas perspectivas futuras, pode-se afirmar que foi

cumprida a motivação inicial de elucidar as características fundamentais dessa fonte de energia, promovendo o conhecimento e fornecendo uma base sólida para estudos e pesquisas subsequentes.

Ao enfrentar o desafio de garantir um suprimento de eletricidade que atenda não apenas à demanda atual, mas também à futura de forma sustentável, a energia nuclear emerge como uma aliada poderosa. Seu potencial de contribuição para o aumento da capacidade de geração, aliado ao constante desenvolvimento tecnológico e otimização, a coloca em posição privilegiada no panorama energético global.

À medida que se avança em direção à meta de emissão zero de poluentes na geração de eletricidade, novas políticas e tecnologias estão tornando esse objetivo cada vez mais alcançável. Com isso, vislumbra-se um futuro onde as gerações vindouras poderão desfrutar de um mundo mais sustentável, com uma significativa redução da degradação ambiental, especialmente no que diz respeito à geração de energia elétrica.

## **ABSTRACT**

This study aims primarily to conduct a comprehensive literature review on nuclear energy, encompassing a thorough analysis of the advantages and disadvantages associated with this form of energy. A detailed history of the use of this source from its beginnings to the present day will be presented, emphasizing its importance in the global energy matrix. Subsequently, the nuclear policies of major producing countries, such as China, the United States, and France, will be examined, along with their plans for the future of nuclear energy and the strategies adopted for sustainability. Following this, the essential components of a nuclear reactor, operational principles, and the specifics of electricity generation through nuclear fission will be outlined. Finally, the focus will be directed to Brazil, exposing the national nuclear potential and its current contribution to electricity generation, with emphasis on the most active regions in this domain.

**Keywords:** Nuclear energy. Nuclear fission. Energy sources. Energy efficiency.

## **REFERÊNCIAS**

AVORY, Christine. **Nuclear Science and Technology**. New York: Larsen and Keller Education, 2018.

BARNABY, Frank. **How to Build a Nuclear Bomb: And Other Weapons of Mass Destruction.** New York: Bold Type Books, 2004.

BODANSKY, David. **Nuclear Energy: Principles, Practices, and Prospects.** 2. Ed. Berlin: Springer, 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030.** Brasília: MME: EPE, 2007. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termonuclear.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BRASIL ESCOLA. **Como funciona uma usina nuclear.** Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/como-funciona-uma-usina-nuclear.htm#:~:text=A%20energia%20dos%20reatores%20nucleares,is%C3%B3topos%20f%C3%ADsseis%20ou%20is%C3%B3topos%20f%C3%A9rteis>. Acesso em: 04 maio 2024.

BROWN, Kate. **Manual for Survival: A Chernobyl Guide to the Future.** New York: W.W. Norton & Company, 2019.

CABRAL, Anya. **História das Usinas Nucleoelétricas no Brasil.** Revista Eletrônica de Energia, v. 1, n. 1, 2011. Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/ree/article/viewFile/1639/1440>. Acesso em: 08 jun. 2024.

CLP. **Daya Bay Nuclear Power Station.** Disponível em: <https://www.clp.com.hk/en/about-clp/power-generation/guangdong-daya-bay-nuclear-power-station>. Acesso em: 04 maio 2024.

COHEN, Bernard Leonard. **The Nuclear Energy Option: An Alternative for the 90s.** New York: Springer, 1990.

CORE Barrel. **Nuclear-Power.** Disponível em: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power-plant/nuclear-reactor/core-barrel/>. Acesso em: 08 jun. 2024.

EARTH.ORG. **5 Mind-Blowing Nuclear Energy Facts**. Disponível em: <https://earth.org/nuclear-energy-facts/>. Acesso em: 04 maio 2024.

EDF. **La centrale nucléaire de Flamanville 3 (EPR)**. Disponível em: <https://www.edf.fr/centrale-nucleaire-flamanville3>. Acesso em: 08 jun. 2024.

ENERGIA NUCLEAR. **Tipos de reatores nucleares**. Disponível em: <https://pt.energia-nuclear.net/usinas-nucleares/reator-nuclear/tipos>. Acesso em: 08 jun. 2024.

ENERGY EDUCATION. **RBMK Reactors**. Disponível em: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/RBMK>. Acesso em: 08 jun. 2024

EPE. **BEN Síntese 2023**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2023\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf). Acesso em: 09 jun. 2024.

FERGUSON, Charles D. **Nuclear Energy: What Everyone Needs to Know**. Oxford: Oxford University Press, 2011.

HORE-LACY, Ian. **Nuclear Energy in the 21st Century: the world nuclear university primer**. 3. Ed. New York: Amer Society of Mechanical, 2012.

IAEA. **What is Uranium?** Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-uranium>. Acesso em: 08 jun. 2024.

IAEA. **Thorium's Long-Term Potential in Nuclear Energy: New IAEA Analysis**. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/thorium-s-long-term-potential-in-nuclear-energy-new-iaea-analysis>. Acesso em: 08 jun. 2024.

IPEN. **Brasil tem potencial para ter uma das três maiores reservas de urânio do mundo**. Disponível em: [https://www.ipen.br/portal\\_por/portal/interna.php?secao\\_id=40&campo=19260](https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=40&campo=19260). Acesso em: 08 jun. 2024

ISAACSON, Walter. **Einstein: His Life and Universe**. New York: Simon & Schuster, 2007.

JOHNSON, Robert. **Estudo sobre energia nuclear**. Londres: Tech Insights, 2023.

JOSKOW, Paul L. **The Future of Nuclear Power in the United States: Economic and Regulatory Challenges**. Center for Energy and Environmental Policy Research. 2006. Disponível em: <https://ceepr.mit.edu/wp-content/uploads/2023/02/2006-019.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2024.

LAMARSH, John R.; BARATTA, Anthony J. **Introduction to Nuclear Engineering**. Hoboken: Prentice Hall, 2001.

MAHAFFEY, Jim. **Atomic Accidents: A History of Nuclear Meltdowns and Disasters: From the Ozark Mountains to Fukushima**. New York: Pegasus Books, 2014.

NEUTRON Moderator. **Nuclear-Power**. Disponível em: <https://www.nuclear-power.com/neutron-moderator/>. Acesso em 08 jun. 2024.

O GLOBO. **Brasil aumenta em 25% a capacidade de enriquecimento do urânio**. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/brasil-aumenta-em-25-capacidade-de-enriquecimento-do-uranio-23024763>. Acesso em: 04 maio 2024.

PALO VERDE. **Palo Verde: Generating Station**. Disponível em: <https://www.paloverde.com/>. Acesso em: 04 maio 2024.

PEREIRA, Newton Müller. **Energia Nuclear: da energia inesgotável à energia limpa**. Revista Brasileira de Energia, v. 8, n. 2, 2001. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/147/130>. Acesso em: 08 jun. 2024.

PLOKHY, Serhii. **Chernobyl: History of a Tragedy**. Allen Lane, 2018.

PORTAL UOL. **Einstein e a equivalência entre matéria e energia**. Disponível em: <https://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/emcsup2sup-einstein-e-a-equivalencia-entre-materia-e-energia.htm>. Acesso em: 04 maio 2024.

RAÍZEN. **Matriz Energética Brasileira: o que é e do que é composta**. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/matriz-energetica-brasileira>. Acesso em: 04 maio 2024.

REACTOR Pressure Vessel. **Nuclear-Power**. Disponível em: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power-plant/nuclear-reactor/reactor-pressure-vessel/>. Acesso em: 08 jun. 2024.

REACTOR Core. **Nuclear-Power**. Disponível em: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power-plant/nuclear-reactor-core/>. Acesso em: 08 jun. 2024.

RHODES, Richard. **The Making of the Atomic Bomb**. Nova York: Simon & Schuster, 1986.

SAGAN, Scott D; WALTZ, Kenneth N. **The Spread of Nuclear Weapons: na enduring debate**. 3. Ed. New York: W.W. Norton & Company, 2012.

SILVA, Antônio Teixeira e. **O futuro da energia nuclear**. Revista USP, n. 76, 2007-2008. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/13636/15454>. Acesso em: 08 jun. 2024.

STATISTA. **Number of nuclear power plants worldwide from 1954 to 2021**. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/263945/number-of-nuclear-power-plants-worldwide/>. Acesso em: 04 maio 2024.

THERMOPEDIA. **Reatores de Grafite Moderado a Gás**. Disponível em: <https://www.thermopedia.com/content/803/>. Acesso em: 08 jun. 2024

U. S. NRC. **Advanced Boiling Water Reactors (ABWR)**. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/large-lwr/design-cert/abwr.html>. Acesso em: 08 jun. 2024

VISUAL CAPITALIST. **Ranked: Nuclear Power Production by Country**. Disponível em: <https://www.visualcapitalist.com/ranked-nuclear-power-production-by-country/>. Acesso em: 04 maio 2024.

VOLUME of Coolant in Reactor Coolant System. **Nuclear-Power**. Disponível em: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power-plant/nuclear-reactor/volume-reactor-coolant-system/>. Acesso em: 08 jun. 2024.

WEART, Spencer R. **The Rise of Nuclear Fear**. Harvard University Press, 2012.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Nuclear Power in the World Today**.  
Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today>. Acesso em: 23 maio 2024.