



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PIAUÍ
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ENERGIA NUCLEAR COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA
LIMPA

Vitor Eduardo Mendes Santos

PIRIPIRI-PI

2025

ENERGIA NUCLEAR COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA LIMPA

Vitor Eduardo Mendes Santos

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Licenciatura Plena em Física da
Universidade Estadual do Piauí, como
requisito para obtenção do título de
Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Otávio de Brito Silva

PIRIPIRI-PI

2025

S237e Santos, Vitor Eduardo Mendes.

Energia nuclear como fonte alternativa de energia limpa /
Vitor Eduardo Mendes Santos. - 2025.
55f.: il.

Monografia (graduação) - Curso de Licenciatura em Física,
Universidade Estadual do Piauí, 2025.
"Orientador: Prof. Dr. Otávio de Brito Silva".

1. Energia Nuclear. 2. Sustentabilidade. 3. Fissão Nuclear. I.
Silva, Otávio de Brito . II. Título.

CDD 530



GOVERNO DO ESTADO DO PIAUÍ
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PIAUÍ – UESPI
CONSELHO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO



ANEXO A RESOLUÇÃO CEPEX 003/2021 (TCC)
ATA DE APRESENTAÇÃO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos seis dias do mês de outubro de 2025, às quatorze horas, na sala da coordenação do mestrado profissional no Campus Professor Antônio Geovane Alves de Sousa, Piripiri – UESPI, na presença da banca examinadora, presidida pelo professor Dr. **Otávio de Brito Silva** e composta pelos seguintes membros: 1) professora Dra. **Eloise Cristina de Souza Rodrigues Garcia** e 2) professor **Dr. Agmael Mendonça Silva**, o aluno **Vitor Eduardo Mendes Santos** apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Licenciatura em Física como elemento curricular indispensável à Colação de Grau, tendo como título: “**ENERGIA NUCLEAR COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA LIMPA**”.

A Banca Examinadora reunida em sessão reservada deliberou e decidiu pelo resultado **APROVADO**, obtendo a nota final **9,7**, ora formalmente divulgado ao aluno e aos demais participantes, e eu professor Dr. **Otávio de Brito Silva**, na qualidade de professor titular da disciplina de TCC II lavrei a presente ata que será assinada por mim, pelos membros da Banca Examinadora e pelo aluno apresentador do trabalho.

Assinaturas:

Documento assinado digitalmente
gov.br OTAVIO DE BRITO SILVA
Data: 07/10/2025 14:48:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

1 – Professor titular da disciplina de TCC

Documento assinado digitalmente
gov.br OTAVIO DE BRITO SILVA
Data: 07/10/2025 14:51:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2 – Presidente da Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
gov.br ELOISE CRISTINA DE SOUZA RODRIGUES GARCI
Data: 21/10/2025 13:35:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

3 – Membro da Banca

Documento assinado digitalmente
gov.br AGMAEL MENDONCA SILVA
Data: 14/10/2025 08:52:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

4 – Membro da Banca

Documento assinado digitalmente
gov.br VITOR EDUARDO MENDES SANTOS
Data: 21/10/2025 20:13:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

5 – Aluno

"A gravidade explica os movimentos dos planetas, mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento". - Issac Newton

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação artística do primeiro reator nuclear da historia.	20
Figura 2: Primeiro porta aviões nuclear do mundo.	22
Figura 3:primeira usina nuclear do brasil, Angra 1.	29
Figura 4: funcionamneto de uma usina nuclear.	38
Figura 5: Grafico das reservas mundiais de Urânio.	39
Figura 6:Grafico das emissões de dioxido de carbono da eletricidadae.	40
Figura 7: Representação da reação de fusão de deutério (D) e trítio (T).	45
Figura 8: Representação da eficiência energética da fusão nuclear.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais trabalhos selecionados para análise bibliográfica.....	27
---	----

RESUMO.

A energia nuclear, frequentemente associada a riscos e acidentes, possui um potencial significativo como fonte alternativa de energia limpa, capaz de suprir a demanda global por eletricidade com baixa emissão de gases de efeito estufa, promovendo a sustentabilidade na geração de energia. O presente trabalho busca analisar os aspectos técnicos, históricos e ambientais da energia nuclear, destacando suas vantagens e desafios na transição para uma matriz energética sustentável. A metodologia adotada consistiu em uma análise bibliográfica e exploratória sobre os aspectos técnicos, ambientais e sociais da energia nuclear. Os resultados obtidos permitem discutir a dualidade da energia nuclear, que pode ser vista tanto como um risco, devido aos resíduos radioativos e à possibilidade de acidentes, quanto como uma oportunidade estratégica para reduzir a emissão de gases de efeito estufa. O trabalho também explora o papel do urânio como fonte de energia, os fenômenos associados como a radiação Tcherenkov e os debates em torno da classificação da energia nuclear como limpa. Além disso, são abordadas as mudanças climáticas e a necessidade de diversificar a matriz energética com fontes de menor impacto ambiental. Por fim, o estudo apresenta a fusão nuclear como uma possível revolução energética do futuro. Com base em avanços recentes, a fusão nuclear se mostra promissora por oferecer energia abundante, segura e com resíduos mínimos contrapondo-se a energia nuclear a partir da fissão nuclear, podendo ser a chave para um desenvolvimento sustentável da humanidade. O estudo conclui que, embora ainda cercada de desafios, a energia nuclear representa uma alternativa relevante e estratégica no contexto da transição energética global.

Palavras-chave: Energia nuclear. Fissão. Fusão, Sustentabilidade. Mudanças climáticas.

ABSTRACT.

Nuclear energy, often associated with risks and accidents, has significant potential as an alternative clean energy source capable of meeting global electricity demand with low greenhouse gas emissions, thus promoting sustainability in energy generation. The present work aims to analyze the technical, historical, and environmental aspects of nuclear energy, highlighting its advantages and challenges in the transition to a sustainable energy matrix. The methodology adopted consisted of a bibliographic and exploratory analysis of the technical, environmental, and social aspects of nuclear energy. The results obtained allow for the discussion of the duality of nuclear energy, which can be seen both as a risk, due to radioactive waste and the possibility of accidents, and as a strategic opportunity to reduce greenhouse gas emissions. The work also explores the role of uranium as an energy source, phenomena such as Tcherenkov radiation, and debates around classifying nuclear energy as clean. Furthermore, it addresses climate change and the need to diversify the energy matrix with sources of lower environmental impact. Finally, the study presents nuclear fusion as a potential energy revolution of the future. Based on recent advances, nuclear fusion appears promising as it offers abundant, safe energy with minimal waste, contrasting with nuclear fission, and could be the key to sustainable development for humanity. The study concludes that, although still surrounded by challenges, nuclear energy represents a relevant and strategic alternative in the context of the global energy transition.

Keywords: Nuclear energy. Fission. Fusion, Sustainability. Climate change.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 Origens da Física nuclear	14
2.2 História da produção de energia nuclear a partir da fissão nuclear.....	15
2.3 O uso benéfico da fissão nuclear	21
2.4 Fundamentos Físicos da Física Nuclear	22
3 METODOLOGIA	26
4 RESULTADOS	28
4.1 Energia nuclear: risco ou oportunidade.....	29
4.2 Urânio: fonte de energia.....	33
4.2.1 Radiação TCherenkov	35
4.3 Indução Eletromagnética e sua Aplicação na Geração de Energia Nuclear	36
4.4 Princípios gerais de funcionamento de uma usina nuclear.....	36
4.5 Desafio da energia nuclear para ser considerada como energia limpa	39
4.5.1 Mudanças climáticas	40
4.5.2 Energia nuclear como fonte viável de eletricidade	41
4.6 A fusão nuclear: a chave para um futuro de energia limpa, segura e inesgotável, impulsionando o progresso sustentável da humanidade	43
4.6.1 Fusão nuclear	44
4.6.2 Fusão nuclear: Breve histórico e promessa de energia limpa e mais eficiente em comparação com fissão e outras fontes	45
5 CONCLUSÃO.....	49
6 REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

A energia nuclear, frequentemente envolta em debates calorosos e opiniões polarizadas, representa uma das mais impressionantes conquistas da ciência moderna e, ao mesmo tempo, uma poderosa ferramenta no enfrentamento de alguns dos maiores desafios enfrentados pela humanidade. O estudo da energia nuclear como fonte alternativa de energia limpa é não apenas relevante, mas também crucial, em um momento histórico em que a crise climática, a busca por independência energética e o crescimento populacional exercem pressão sobre os sistemas de energia globais, como destaca Celso Cunha, Presidente da Associação Brasileira para o Desenvolvimento de Atividades Nucleares (ABDAN), Segundo CUNHA (2020) os desafios e as oportunidades da energia nuclear no Brasil são amplos e exigem análise detalhada.

Essa tecnologia, que envolve a liberação de energia a partir do núcleo do átomo, tem demonstrado uma capacidade incomparável de produzir eletricidade em grande escala, sem a emissão de gases de efeito estufa durante sua operação. Ao longo das últimas décadas, ela evoluiu de forma significativa, desde o final da década de 1930 grupos de físicos e químicos ao qual podemos destacar Fermi, o casal francês Frédéric e Joliot, Irène Curie e Lise Meitner que se destacaram em desvendar o mistério dos transurânicos, logo após em 1938 Fermi e Szilárd concluíram que os nêutrons de fissão poderiam provocar novas fissões e liberar quantidades exorbitantes de energia (TAVARES,2019), passando de um recurso explorado principalmente por grandes potências mundiais para uma solução viável que muitos países estão reavaliando como parte de suas estratégias de diversificação energética e mitigação dos impactos ambientais.

A energia nuclear oferece uma alternativa energética de baixo carbono que pode ser integrada a matrizes energéticas diversificadas. Ao contrário de fontes tradicionais como carvão, petróleo e gás natural, a produção de eletricidade por reatores nucleares praticamente elimina a liberação de gases responsáveis pelo efeito estufa, contribuindo de maneira efetiva para a desaceleração do aquecimento global. Um dos grandes diferenciais dessa fonte energética é a capacidade de gerar grandes volumes de energia com recursos relativamente limitados. Um pequeno volume de urânio, por exemplo, pode produzir a mesma quantidade de energia que toneladas de carvão ou petróleo, tornando-a uma solução altamente eficiente em termos de densidade energética. Ao contrário de fontes renováveis, como energia solar e eólica, que dependem de fatores climáticos e geográficos, a energia nuclear oferece um fornecimento constante e previsível de energia, o que a torna indispensável para países e regiões que

necessitam de uma base energética estável para sustentar seu desenvolvimento econômico. Nas últimas décadas, avanços tecnológicos têm transformado o setor de energia nuclear. Reatores de quarta geração, pequenos reatores modulares (PRMs) e reatores com ciclos de combustíveis mais limpos estão em desenvolvimento, prometendo maior segurança, menor produção de resíduos e custos mais acessíveis. (Pereira, De Stefani e Schirru, 2024) Embora a energia nuclear ofereça inúmeros benefícios, ela também apresenta desafios, como o gerenciamento seguro de resíduos radioativos e os altos custos iniciais de construção de usinas. No entanto, com uma regulamentação rigorosa, novas tecnologias e práticas de gestão inovadoras, muitos desses obstáculos estão sendo superados. Segundo Montalvão (2012), a energia nuclear se posiciona em um limiar entre risco significativo e oportunidade estratégica.

A energia nuclear é uma alternativa que deve ser mantida, e seu papel na matriz energética global está se tornando cada vez mais relevante. Atualmente, já existem reatores nucleares com tecnologias avançadas, e projetos ainda mais modernos, como os da chamada Geração IV, estão em fase de pesquisa e desenvolvimento, com previsão de disponibilidade a partir de 2035. Diversos países têm investido na construção de usinas nucleares para diversificar suas matrizes energéticas, garantir segurança no fornecimento de energia e diminuir a dependência de fontes menos econômicas, demonstrando alinhamento com suas políticas energéticas, pois embora o investimento inicial na construção de usinas nucleares seja elevado, os benefícios estratégicos e econômicos a longo prazo justificam esse custo, a energia nuclear garante estabilidade no fornecimento, reduz a dependência de fontes fósseis e se alinha às metas ambientais de longo prazo, assim, o custo inicial é compensado por décadas de operação segura, eficiente e sustentável. O abastecimento global de urânio é suficiente para atender à demanda das novas centrais nucleares, mas os debates sobre os benefícios e desafios dos ciclos do combustível nuclear, tanto aberto quanto fechado, precisam continuar, assim como as pesquisas relacionadas. Avanços significativos na tecnologia e nos custos associados à energia nuclear podem ajudar a mudar a percepção pública sobre essa fonte de energia. Programas como a Geração IV e o Inpro (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) devem ser acompanhados pelos governos que buscam ingressar ou expandir suas iniciativas na área nuclear, além do avanço da energia nuclear por meio da fusão nuclear. É essencial que o formato proposto para a expansão da energia nuclear seja debatido de forma transparente e inclusiva, envolvendo todos os interessados no futuro da geração de energia, com foco em segurança, estabilidade de fornecimento e riscos mínimos de proliferação. O Brasil possui uma posição vantajosa nesse cenário, sendo um dos poucos países, juntamente com os Estados Unidos e a Rússia, que contam com reservas de urânio e dominam a tecnologia do ciclo do

combustível. O Plano Nacional de Energia (PNE) 2030 foca na diversificação da matriz energética, atualmente predominada pela geração hidrelétrica (MONTALVÃO, 2012), através de investimentos em fontes complementares. Nesse contexto, a energia nuclear ganha importância, com uma previsão de expansão progressiva que pode chegar a oito novas usinas até 2050. Essa estratégia busca atender às diretrizes do Programa Nuclear Brasileiro, que incluem a preservação do conhecimento técnico adquirido, o avanço tecnológico e a renovação da força de trabalho especializada no setor.

O Brasil, com sua vasta extensão territorial e recursos energéticos diversificados, encontra na energia nuclear uma oportunidade estratégica, já que conta com reservas expressivas de urânio. Mesmo em países com territórios relativamente pequenos, como a França, cuja matriz energética é composta por 78% de energia nuclear (TEIXEIRA, 2008), a produção de energia por meio nuclear se mostra uma opção mais viável, visto que não depende de rios, como no caso da energia oriunda da fonte hidrelétrica. Sua construção limita-se ao prédio onde será instalado o reator, não exigindo demasiados recursos naturais ou artificiais em abundância. (Cunha, 2023). A Usina de Angra, localizada na cidade do Rio de Janeiro, já em operação, é um exemplo do potencial da energia nuclear no fornecimento sustentável de eletricidade. Além disso, esta pesquisa desempenha um papel estratégico na transformação da percepção pública sobre o futuro energético do mundo, promovendo consciência, engajamento e apoio à modernização da infraestrutura mundial e o alinhamento com as metas globais de sustentabilidade. A energia nuclear está no centro de debates sobre como atingir as metas de neutralidade de carbono até meados do século XXI, sua relevância global é um argumento sólido para investigar o assunto. O tema está diretamente ligado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, incluindo energia limpa e acessível, consumo responsável e ações climáticas. Ao explorar novas tecnologias e políticas públicas relacionadas à energia nuclear, é possível produzir um trabalho acadêmico original e impactante.

Um TCC neste campo pode abrir portas para a exploração de tecnologias emergentes, como os já mencionados reatores modulares e sistemas de fusão nuclear, que prometem revolucionar o setor energético. Dessa forma, a escolha de **“Energia Nuclear como Fonte Alternativa de Energia Limpa”** como tema de TCC não apenas se posiciona na vanguarda dos debates sobre energia sustentável, mas também oferece uma plataforma para a exploração de soluções práticas e inovadoras para os desafios energéticos do futuro. Esse trabalho pode contribuir para uma visão mais equilibrada e informada sobre o papel da energia nuclear na transição energética, portanto, compreender os aspectos teóricos e práticos relacionados à

energia nuclear é essencial para avaliar suas contribuições, limitações e perspectivas para um futuro energético sustentável. Neste contexto, o presente trabalho busca explorar os fundamentos da energia nuclear, seus impactos na sociedade e as tecnologias envolvidas, com o objetivo de proporcionar uma visão abrangente sobre o tema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A energia nuclear representa um dos avanços mais significativos da ciência moderna, oferecendo uma fonte alternativa e de alta densidade energética para atender às demandas crescentes da sociedade contemporânea, Segundo Tavares (2019), a fissão nuclear é uma das fontes de energia mais abundantes disponíveis. Com o potencial de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar as emissões de gases de efeito estufa, a energia nuclear se destaca como uma alternativa sustentável em meio às crescentes preocupações com a crise climática.

2.1 Origens da Física nuclear

Física nuclear é o ramo da ciência que estuda o núcleo dos átomos, suas propriedades, comportamento e as forças que o mantêm unido. O núcleo é composto por prótons (partículas com carga positiva) e nêutrons (partículas sem carga). Esses são mantidos juntos pela força nuclear forte, que é uma das quatro forças fundamentais da natureza. A física nuclear tem como foco o estudo do núcleo atômico e suas características. Os primeiros fenômenos relacionados a essa área foram observados entre o final do século XIX e o início do século XX, sendo ligados aos trabalhos de cientistas como Henri Becquerel, Pierre Curie e Marie Curie(BARROZO, 2012).

Em 1896, Henri Becquerel realizou experimentos com sais de urânio e notou que placas fotográficas escureciam quando estavam próximas a materiais contendo esses sais. Ele também percebeu que o ar ao redor se tornava ionizado. Esse fenômeno foi explicado como a emissão de raios invisíveis. A esse efeito deu-se o nome de radioatividade, e os materiais com essa propriedade passaram a ser chamados de radioativos. Utilizando cristais de sulfato duplo de urânio e potássio, que se apresentam sob a forma de uma camada fina e transparente, realizou o experimento : Uma chapa fotográfica Lumière foi envolvida em duas folhas de papel preto espesso, garantindo que permanecesse protegida e não fosse escurecida mesmo após exposição direta ao Sol por várias horas. Sobre esse papel, posicionou uma placa da substância fosforescente, e todo o conjunto foi submetido à luz solar por um longo período. Quando a chapa foi revelada, surgiu a imagem da substância fosforescente, visível como uma silhueta escura no negativo. Ao introduzir objetos como moedas ou placas metálicas com perfurações

entre a substância fosforescente e o papel, as formas desses itens também se tornaram visíveis no negativo. Repetindo o experimento, inseriu uma lâmina fina de vidro entre o papel e a substância fosforescente, o que descartou qualquer possibilidade de que vapores, liberados pelo aquecimento solar, fossem os responsáveis por alguma reação química. Assim, os resultados confirmam que essa substância fosforescente emite radiações capazes de atravessar o papel opaco e sensibilizar os sais de prata presentes na chapa fotográfica (Martins,1990). Posteriormente, Pierre e Marie Curie descobriram a radioatividade presente no tório e conseguiram isolar os elementos polônio e rádio a partir de sais de urânio.

Ernest Rutherford realizou estudos detalhados sobre os raios radioativos e identificou três tipos principais: raios α , raios β e raios γ . Os raios β são formados por elétrons com carga negativa, enquanto os raios α são partículas com carga positiva (posteriormente descobriu-se que se tratam de núcleos de hélio). Já os raios γ não possuem carga elétrica e são semelhantes aos raios X descobertos por Roentgen, mas são mais penetrantes.

Em 1911, Rutherford apresentou o modelo planetário do átomo, onde propôs que o átomo é constituído por um núcleo denso e com carga positiva ao redor do qual os elétrons orbitam. Segundo seu modelo, os raios radioativos são gerados por processos que ocorrem dentro do núcleo dos átomos (TAVARES, 2019). Após James Chadwick ter descoberto o nêutron em 1932, ficou estabelecido que o núcleo é composto por prótons e nêutrons, chamados de nucleons. Os símbolos usados para essas partículas são "p" para próton e "n" para nêutron.

2.2 História da produção de energia nuclear a partir da fissão nuclear

O termo "fissão" refere-se ao ato de ruptura, separação ou divisão. Quando aplicado à física nuclear, está relacionado ao núcleo atômico, que é a parte central de um átomo. Assim, a fissão nuclear é o fenômeno físico no qual o núcleo de um átomo se divide em fragmentos, geralmente dois, com tamanhos similares. Esse processo ocorre mais facilmente quando núcleos atômicos de elementos com grande massa, como tório ou urânio, são atingidos por nêutrons. Em casos mais raros, a fissão pode acontecer espontaneamente. Ambos os tipos de fissão liberam uma quantidade colossal de energia. Quando um nêutron é capturado por um núcleo instável (como o urânio-235), o núcleo se torna ainda mais instável e sofre fissão. Durante a fissão, o núcleo pesado é dividido em dois núcleos menores (chamados de produtos de fissão), como bário e criptônio, além de liberar alguns nêutrons adicionais. A energia liberada

na fissão é resultado da diferença de massa entre os produtos de fissão e o núcleo original. Essa diferença de massa é convertida em energia, conforme a famosa equação de Einstein, $E = mc^2$, onde E é a energia, m é a massa e c é a velocidade da luz. Os nêutrons liberados durante a fissão podem colidir com outros núcleos de urânio ou plutônio, causando novas fissões e gerando uma reação em cadeia, que é a base da energia nuclear, a fissão também emite radiação gama e partículas como neutrinos, que fazem parte do processo. Para ilustrar: a fissão nuclear de apenas 20 gramas de urânio (um volume equivalente a um cubo de 1 cm de lado) gera uma energia comparável à obtida pela combustão de 40 mil litros de óleo diesel (CUNHA, 2023).

As descobertas científicas que antecederam a fissão nuclear ocorreram na Europa durante a primeira metade da década de 1930. Após a descoberta do nêutron, descrito por Ernest Rutherford como um “próton neutro” devido à ausência de carga elétrica, realizada pelo físico britânico James Chadwick em fevereiro de 1932, Ettore Majorana, físico italiano, concluiu já em março do mesmo ano que os núcleos atômicos são compostos por prótons e nêutrons. Outro destacado físico italiano, Enrico Fermi, começou com sua equipe, no início de 1934, a criar novos tipos de núcleos atômicos ao bombardear elementos da Tabela Periódica com nêutrons. Em maio do mesmo ano, ao utilizar urânio como alvo, acreditaram erroneamente que haviam produzido elementos acima do urânio, conhecidos como transurânicos, sendo o urânio (número atômico 92) o último elemento encontrado na natureza (TAVARES, 2019). No entanto, em setembro de 1934, a química alemã Ida Noddack questionou as conclusões de Fermi sobre os "transurânicos" e sugeriu que seria possível que os núcleos de urânio, ao serem bombardeados por nêutrons, se fragmentassem em pedaços menores e de massa intermediária. O físico húngaro Leó Szilárd apoiou a sugestão de Ida Noddack, também discordando da interpretação de Fermi.

Enquanto isso, na América do Norte, o físico canadense-americano Arthur J. Dempster, da Universidade de Chicago, aperfeiçoou nos anos 1920 seu invento, o espectrômetro de massa, um instrumento de alta precisão que permitiu determinar a composição isotópica de vários elementos. As diferenças nos espectros de massa eram causadas pela variação no número de nêutrons nos núcleos de átomos do mesmo elemento, conhecidos como isótopos. Enquanto as pesquisas avançavam na Europa, Dempster, em 1935, realizou a primeira análise da composição isotópica do urânio, identificando o isótopo de massa 235 (conhecido como ^{235}U). Ele descobriu que esse isótopo representava apenas 0,4% dos átomos presentes no urânio natural, enquanto o isótopo predominante era o ^{238}U , com uma fração de 99,6%. Três anos mais tarde, medições ainda mais precisas feitas pelo físico norte-americano Alfred O. C. Nier

apontaram proporções levemente ajustadas: 0,71% para o ^{235}U e 99,28% para o ^{238}U . Já em 1939, ficou claro que a fissão do urânio, ao ser bombardeado com nêutrons, ocorria devido à absorção de nêutrons lentos pelo isótopo ^{235}U .

Durante o final dos anos 1930, diversos grupos de físicos e químicos europeus se dedicaram ao desafiador estudo dos transurânicos, um tema inicialmente proposto por Fermi, mas contestado por Ida Noddack e Leó Szilárd. Três grupos se destacaram nesse enigma: Fermi e sua equipe em Roma; o casal de químicos franceses Frédéric Joliot e Irène Curie em Paris; e a física austríaca Lise Meitner, que trabalhava com os químicos alemães Otto Hahn e Fritz Strassmann no Instituto Kaiser Wilhelm, em Berlim-Dahlem. O regime nazista, liderado por Adolf Hitler, forçou Fermi, casado com Laura Fermi, uma judia italiana, a deixar a Itália. Em dezembro de 1938, ele passou pela Suécia antes de emigrar com sua família para os Estados Unidos. Lise Meitner, também de origem judaica, refugiou-se na Suécia em julho do mesmo ano, após colaborar com Hahn e Strassmann em estudos sobre a transformação do urânio ao ser bombardeado por nêutrons.

No final de 1938, Hahn e Strassmann hesitaram em publicar os resultados de seus experimentos, que revelavam a presença de isótopos de bário como produtos do bombardeamento de urânio. Sem conseguir explicar o fenômeno, Hahn procurou Meitner, afirmando estar confiante no método radioquímico utilizado, mas não compreendendo a física envolvida. Meitner o encorajou, assegurando que não havia razão para considerar o resultado impossível. Durante o período de descanso no Natal de 1938, Lise Meitner conversou com seu sobrinho, Otto Frisch, sobre os resultados obtidos nos experimentos. Eles exploraram e analisaram essas descobertas juntos, buscando compreender o fenômeno apresentado.

Essa reflexão levou Meitner e Frisch à conclusão de que o núcleo do urânio poderia se dividir em dois fragmentos com números atômicos intermediários. Eles denominaram esse novo fenômeno físico de fissão. De acordo com esse processo nuclear, caso o bário (número atômico 56) fosse identificado como um dos produtos, o elemento complementar seria o criptônio (número atômico 36), pois a soma desses números (92) corresponde ao número atômico do urânio. Logo depois, Hahn e Strassmann confirmaram experimentalmente a presença de criptônio em seus estudos. Os químicos alemães Otto Hahn e Fritz Strassmann comunicaram oficialmente, em 22 de dezembro de 1938 (e publicaram em 6 de janeiro de 1939), evidências indiscutíveis da presença de isótopos de bário e lantânio (posteriormente, também de estrôncio e ítrio) como resultado do bombardeamento do urânio com nêutrons. Foi a prova química de que o urânio (e o tório, em outros casos) ao ser bombardeado por nêutrons,

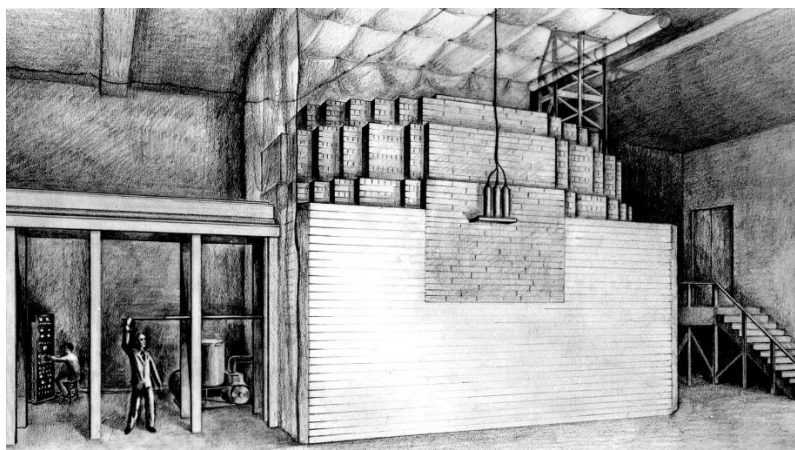
originava elementos com números atômicos intermediários (38, 39, 56, 57 e outros), correspondendo a cerca de 40% e 60% do número atômico do urânio (92) e do tório (90). Essas foram as primeiras evidências químicas do novo fenômeno nuclear. Com 60 anos, Lise Meitner desempenhou um papel crucial nessa descoberta: ela propôs o modelo nuclear em formato de gota para explicar a fissão e calculou com precisão a energia liberada no processo, estimando cerca de 200 MeV (duzentos milhões de elétron-volts, equivalente a $3,2 \times 10^{-11}$ Joules) para um único núcleo de urânio. Já Otto Frisch, no início de 1939, previu como seriam distribuídas a carga, a massa e a energia cinética dos fragmentos resultantes da fissão. Ele também ofereceu evidências físicas para esse novo fenômeno ao detectar uma intensa ionização causada por esses fragmentos.

Entre março e abril de 1939, Fermi e Szilárd nos Estados Unidos, a equipe Joliot-Curie em Paris, e outros grupos de pesquisadores descobriram, por meio de seus experimentos, que cada evento de fissão liberava de 2 a 3 nêutrons. Esse achado notável levou os cientistas a concluir que os nêutrons produzidos na fissão poderiam desencadear, em um intervalo de tempo extremamente curto, novas fissões em átomos próximos dentro de uma massa de urânio. Esse processo poderia gerar uma reação em cadeia e liberar uma quantidade colossal de energia. Quando não controlada, uma reação em cadeia poderia resultar em uma explosão massiva, semelhante a uma bomba de grande poder destrutivo. Por outro lado, ao ser devidamente controlada, a reação poderia ser utilizada para gerar energia útil, como acontece atualmente em usinas nucleares de geração de eletricidade. Curiosamente, a descrição detalhada de uma reação em cadeia de fissão foi publicada pelo físico alemão Siegfried Flügge em julho de 1939. Isso gerou desconfiança e preocupação entre cientistas refugiados e outros que se sentiam ameaçados, pois temiam que os alemães pudessem desenvolver uma arma baseada na fissão de núcleos de urânio.

Ainda em julho, um grupo de cientistas nos Estados Unidos, liderados por Leó Szilárd, redigiu uma carta dirigida ao presidente norte-americano Franklin D. Roosevelt, alertando-o sobre o perigo e solicitando apoio governamental para enfrentar a ameaça. Cientistas na Inglaterra e nos EUA temiam que os alemães fossem capazes de criar uma arma de alto poder destrutivo. A carta foi assinada pelo renomado físico Albert Einstein em 2 de agosto, que comentou: “...pela primeira vez na história, o homem usará energia que não provém do Sol”. Pouco tempo depois, em 1º de setembro de 1939, Hitler invadiu a Polônia, marcando o início da Segunda Guerra Mundial.

Com base nas informações detalhadas no Memorando Frisch-Peierls, os cientistas nos Estados Unidos conseguiram persuadir o governo americano a oferecer apoio ao seu trabalho. Assim, no início de 1942, foi estabelecido o Projeto Manhattan, com o propósito de desenvolver a bomba atômica. Um passo crucial para o êxito desse empreendimento foi a realização da primeira reação em cadeia autossustentada, que liberou energia nuclear de forma controlada. Essa conquista foi alcançada na tarde de 2 de dezembro de 1942 por Enrico Fermi e sua equipe, quando fizeram funcionar, nas instalações da Universidade de Chicago, o primeiro reator nuclear com potência de 200 W (Figura 1). Esse evento marcou a história recente da humanidade e deu início à chamada era nuclear. Fermi, junto com Anderson, deu início na Universidade de Chicago ao projeto de uma Pilha Nuclear maior do que o planejado inicialmente para a Universidade de Columbia. Apesar das objeções de Compton e do General L. R. Greaves, que foi nomeado em setembro de 1942 como chefe do M.E.D. (Manhattan Engineer District) para gerenciar os projetos de aplicação militar da energia nuclear, o reator foi construído no estádio de atletismo da universidade. Um dos principais desafios enfrentados na construção do Reator de Chicago foi determinar a disposição geométrica do combustível e selecionar um moderador eficiente para os nêutrons, o controle da reação era feito por cilindros de cádmio, que absorviam nêutrons. Ao retirar os cilindros, a atividade dos nêutrons aumentava, iniciando a reação em cadeia; ao reinseri-los, a reação era interrompida. Esse experimento foi realizado em um ambiente sem proteção contra radiação ou sistema de refrigeração, o que representava um risco significativo. Os pesquisadores decidiram utilizar barras de cádmio, material com alta capacidade de absorção de nêutrons, conforme identificado anteriormente pelo grupo de Fermi durante estudos conduzidos na Universidade de Roma. Anderson e Zinn foram responsáveis por calcular a posição adequada das barras de controle de cádmio no reator (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2022).

Figura 1: Representação artística do primeiro reator nuclear da história.



Fonte: gizmodo. Disponível em: <https://es.gizmodo.com>. Acesso em 10 abr. 2025.

O Projeto Manhattan envolveu mais de 100 mil pessoas durante aproximadamente três anos e teve um custo de cerca de 30 bilhões de dólares em valores atuais. Foi, até então, o maior esforço científico, tecnológico e inovador já realizado pela humanidade. Participaram do projeto cerca de noventa cientistas, incluindo físicos, químicos e profissionais de diversas áreas, além de inúmeros engenheiros especializados. A maioria dos cientistas tinha entre 30 e 35 anos, com uma média de idade inferior a 40 anos. Além dos norte-americanos, havia a colaboração de muitos outros especialistas de diferentes nacionalidades. O resultado imediato do Projeto Manhattan foi a criação de três bombas atômicas que foram detonadas em 1945. A primeira foi usada no teste Trinity, realizado em 16 de julho, no deserto do Novo México. As outras duas foram lançadas sobre as cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, nos dias 6 e 9 de agosto, respectivamente. Nesse momento, a guerra na Europa já havia terminado, com o suicídio de Hitler em 2 de maio e a rendição da Alemanha aos aliados cinco dias depois. Essas ações levaram ao fim da Segunda Guerra Mundial, com a rendição oficial do Japão em 14 de agosto, reconhecida formalmente em 2 de setembro de 1945.

Embora a energia da fissão nuclear tenha sido utilizada de maneira controlada pela primeira vez no reator de Chicago, em dezembro de 1942, os eventos da guerra fizeram com que essa energia fosse empregada de forma descontrolada e devastadora, para fins militares, nas explosões nucleares que marcaram o final do conflito mundial.

2.3 O uso benéfico da fissão nuclear

O norte-americano Linus Pauling (1901–1994) destacou-se como químico, bioquímico, especialista em química quântica e biologia molecular. Ele foi professor de Química no Instituto de Tecnologia da Califórnia (CALTECH, Pasadena, CA) e permanece, até hoje, entre os quatro cientistas que receberam o Prêmio Nobel em duas ocasiões. Pauling foi premiado com o Nobel de Química em 1954, pelas suas pesquisas sobre a natureza das ligações químicas, e com o Nobel da Paz em 1962, por sua atuação contra os testes de armas nucleares. Linus Pauling sempre acreditou nas inúmeras aplicações pacíficas que podem ser obtidas com a produção controlada de energia a partir da fissão nuclear. Há quase sete décadas, ele previu a importância extraordinária desse fenômeno físico como uma fonte inigualável de geração de energia. Ele afirmou: “Acredito que em breve será reconhecido que a descoberta da fissão controlada de núcleos atômicos e a liberação controlada de energia atômica é a maior descoberta feita desde que o uso controlado do fogo foi descoberto pelo homem primitivo.”

De fato, sua previsão se concretizou. Cientistas, engenheiros e técnicos do setor nuclear conseguiram "dominar" a produção em grande escala de energia proveniente da fissão nuclear, desenvolvendo os chamados reatores de fissão. Esses dispositivos permitem que as reações de fissão em cadeia (e outras reações nucleares) ocorram de forma controlada, sustentável e segura. Hoje, diversas aplicações derivadas da fissão nuclear estão disponíveis e fazem parte do cotidiano de bilhões de pessoas ao redor do mundo, como reatores nucleares são usados em submarinos e navios de guerra para oferecer autonomia e energia por longos períodos sem necessidade de reabastecimento, isótopos radioativos produzidos em reatores nucleares são aplicados em radioterapia e diagnóstico por imagem, como exames de PET scan (Tomografia por Emissão de Pósitrons, é um exame de imagem avançado usado na medicina para avaliar a atividade metabólica e funcional de tecidos e órgãos), radiação proveniente de fissão é usada para esterilizar alimentos, prolongando sua vida útil, e em estudos de mutações para melhorar cultivos agrícolas, estudos sobre partículas subatômicas e física avançada são conduzidos com radiação gerada por fissão nuclear e isótopos radioativos são utilizados em aplicações como controle de qualidade, medição de materiais e sensores industriais (TAVARES, 2019). Desde a segunda metade da década de 1950, com o início das operações das quatro unidades de produção de energia nuclear do complexo Calder Hall, com uma potência total de 240 MW, localizadas em Seascale, no Reino Unido, os reatores nucleares de grande porte passaram a ser

amplamente utilizados, principalmente para a geração de eletricidade destinada ao consumo geral e para a propulsão de embarcações navais.

Simultaneamente, a primeira embarcação equipada com propulsão nuclear foi o submarino Nautilus, dos EUA, construído em 1954 com um reator de potência de 10 MW, permitindo-lhe atravessar o Polo Norte. Na década de 1960, surgiram os primeiros navios mercantes movidos a energia nuclear, como o Savannah (EUA), com potência de 74 MW, e o Otto Hahn (Alemanha), de 38 MW. As marinhas dos EUA, Reino Unido, Japão, Rússia e China passaram a dominar a tecnologia avançada de propulsão naval. Um exemplo notável foi o porta-aviões norte-americano USS Enterprise, com potência de 210 MW, que esteve em serviço entre 1961 e 2012 (Figura 2). Atualmente, existem 220 reatores de potência utilizados em porta-aviões, submarinos e quebra-gelos, conferindo ao setor naval uma performance altamente eficiente (TAVARES, 2019).

Figura 2: Primeiro porta aviões nuclear do mundo.



Fonte: codinomeinformante. Disponível em: <https://codinomeinformante.blogspot.com/2012/11/uss-enterprise-primeiro-porta-avioes.html>. Acesso em 12 out. 2025.

2.4 Fundamentos Físicos da Física Nuclear

A Física Nuclear é o ramo da física que se dedica ao estudo da estrutura, composição e interações do núcleo atômico como já discorrido, fornecendo a base teórica para compreender fenômenos naturais e suas aplicações tecnológicas, como a geração de energia nuclear, o

desenvolvimento de reatores, a medicina nuclear e a datação de materiais por exemplo. Essa área da ciência emergiu no início do século XX, quando experimentos sobre radioatividade e espalhamento de partículas evidenciaram a necessidade de um modelo nuclear para explicar o comportamento dos átomos. A descoberta do núcleo, realizada por Ernest Rutherford em 1911, por meio de experimentos de dispersão de partículas alfa em folhas de ouro, revelou que a maior parte da massa do átomo estava concentrada em uma região central e extremamente densa, posteriormente denominada núcleo. Essa descoberta revolucionou o modelo atômico de Thomson, que considerava a massa distribuída uniformemente, e estabeleceu a base para a física nuclear moderna (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Os núcleos atômicos possuem propriedades físicas específicas que determinam sua estabilidade e comportamento em diferentes processos nucleares. O tamanho dos núcleos é da ordem de 10^{-14} metros, cerca de 100.000 vezes menor que o raio do átomo, evidenciando a concentração massiva no núcleo. Cada núcleo é composto por prótons, portadores de carga positiva, e nêutrons, partículas neutras, denominadas coletivamente nucleons. A energia de ligação nuclear, que representa a quantidade de energia necessária para separar o núcleo em suas partículas constituintes, é um indicador de sua estabilidade: quanto maior a energia de ligação por nucleon, mais estável é o núcleo. Adicionalmente, o momento magnético nuclear, derivado do spin dos nucleons, influencia as interações nucleares em campos magnéticos externos e é fundamental para técnicas como ressonância magnética nuclear (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Os núcleos instáveis sofrem decaimento radioativo, processo espontâneo em que partículas ou radiação eletromagnética são emitidas para que o núcleo atinja maior estabilidade. A radioatividade pode se manifestar de três formas principais: decaimento alfa, decaimento beta e emissão gama. O decaimento alfa envolve a emissão de uma partícula alfa, formada por dois prótons e dois nêutrons, reduzindo o número de massa em quatro unidades e o número atômico em duas unidades. Esse tipo de decaimento é comum em núcleos pesados, como o urânio-238 e o tório-232, e é governado por efeitos quânticos, como o túnel, que permite a saída da partícula alfa através da barreira de potencial do núcleo (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). O decaimento beta ocorre quando um nêutron se transforma em um próton (decaimento beta negativo) ou um próton se transforma em um nêutron (decaimento beta positivo), acompanhado da emissão de elétrons, pósitrons e neutrinos ou antineutrinos, alterando a composição nuclear sem alterar significativamente a massa. Esse processo é crucial para a transformação de elementos químicos e ocorre em núcleos com excesso de nêutrons ou prótons. Nesse contexto falando um pouco sobre a datação radioativa, sendo uma técnica científica usada para

determinar a idade de materiais orgânicos e inorgânicos com base no decaimento de elementos radioativos presentes neles, utiliza o conhecimento do tempo de meia-vida para determinar a idade de amostras geológicas e arqueológicas. Por exemplo, a análise de carbono-14 é empregada para datação de materiais orgânicos com até 50.000 anos de idade, sendo amplamente utilizada em arqueologia e paleontologia. Para compreender os efeitos biológicos da radiação e controlar a exposição em laboratórios e indústrias, utiliza-se a medida da dose de radiação, expressa em Gray (Gy) para a energia absorvida por quilograma de tecido e em Sievert (Sv) para efeitos biológicos, considerando fatores de ponderação específicos para cada tipo de radiação (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Para explicar a estrutura e o comportamento nuclear, diferentes modelos teóricos foram desenvolvidos. O modelo de gota líquida considera o núcleo como uma gota de líquido incompressível, enfatizando a coesão das partículas e permitindo calcular a energia de ligação e prever fenômenos como a fissão. O modelo de cascas propõe que os nucleons ocupam níveis de energia discretos, semelhante à disposição dos elétrons em camadas atômicas, explicando a ocorrência de núcleos especialmente estáveis, conhecidos como núcleos mágicos. Esses modelos, combinados com princípios da mecânica quântica, permitem compreender a distribuição de nucleons, a estabilidade nuclear, os decaimentos radioativos e os processos de fissão e fusão (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Falando novamente sobre a fissão nuclear processo no qual núcleos pesados, como urânio-235 ou plutônio-239, absorvem um nêutron, tornando-se instáveis e fragmentando-se em núcleos menores, liberando grande quantidade de energia e novos nêutrons. Esses nêutrons podem provocar fissões adicionais, originando uma reação em cadeia que, quando controlada, é utilizada em reatores nucleares para produção de energia elétrica, sendo esses reatores nucleares compostos por combustível nuclear, moderadores para reduzir a velocidade dos nêutrons, barras de controle para regular a reação e sistemas de resfriamento que transferem o calor gerado para turbinas, convertendo energia térmica em energia elétrica. Modelos de fissão permitem prever os fragmentos produzidos e a energia liberada, sendo essenciais para a operação segura e eficiente dos reatores (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016), falando de outro fenômeno físico, a fusão nuclear, por outro lado, envolve a união de núcleos leves, como os isótopos de hidrogênio, formando núcleos mais pesados e liberando uma enorme quantidade de energia. Esse processo é responsável pela produção de energia em estrelas, incluindo o Sol, e tem grande potencial como fonte limpa e abundante de energia na Terra, embora seu controle ainda seja um desafio tecnológico significativo. A fusão exige temperaturas extremamente altas para vencer a

repulsão eletrostática entre os núcleos e técnicas avançadas de confinamento, como confinamento magnético ou inercial, para sustentar a reação (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho utiliza a revisão bibliográfica como metodologia principal, com o objetivo de investigar o uso da energia nuclear como fonte alternativa de energia limpa, considerando seus benefícios, desafios e impactos ambientais e sociais. A escolha da revisão bibliográfica se justifica pela necessidade de analisar de forma abrangente as contribuições teóricas e práticas já disponíveis na literatura sobre o tema, consolidando uma base de conhecimento sólida e bem fundamentada. Para a execução da pesquisa, foram definidos os objetivos gerais e específicos, bem como as questões norteadoras que guiaram a seleção das fontes bibliográficas. A busca foi realizada em bases de dados acadêmicas confiáveis, como Scielo, ScienceDirect, Google Acadêmico, etc, utilizando palavras-chave como "energia nuclear", "energia limpa", "fontes alternativas de energia" e "impactos ambientais da energia nuclear". Foram priorizados artigos científicos, livros, teses e relatórios técnicos publicados nos últimos anos, garantindo a atualidade e relevância dos dados coletados, foram encontrados inicialmente 35 fontes bibliográficas, dos quais 8 foram excluídos por não atenderem aos critérios de inclusão (publicações entre 2005 e 2025, em português, no entanto, obras anteriores a esse período também foram incluídas nos referenciais teóricos por sua importância histórica e contribuição fundamental para a compreensão do tema), ao final, 26 trabalhos foram analisados, e um livro. Os critérios de inclusão consistiram em materiais que abordassem a temática da energia nuclear sob a perspectiva ambiental, tecnológica e econômica, com foco na análise de suas vantagens e desvantagens como fonte energética limpa. Já os critérios de exclusão consideraram estudos que apresentavam dados incompletos ou que não estavam alinhados ao objetivo do trabalho. Após a seleção, os documentos foram organizados e submetidos a uma análise sistemática, que incluiu leitura crítica, identificação de ideias centrais e comparação entre abordagens e teorias apresentadas pelos autores. Essa análise permitiu compreender o papel da energia nuclear na transição energética global, examinando desde sua capacidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa até seus desafios, como o manejo de resíduos radioativos e os riscos associados a acidentes nucleares. Além disso, foi realizada uma interpretação qualitativa do conteúdo, visando conectar os dados e argumentações encontrados com o contexto atual do desenvolvimento sustentável. A síntese das informações coletadas contribuiu para a construção de um referencial teórico consistente, capaz de embasar a discussão sobre a viabilidade da energia nuclear como alternativa estratégica na matriz energética global, conforme mostra a (Tabela 1), os trabalhos selecionados abrangem diferentes tipos de publicação. Dessa forma, a metodologia aplicada neste trabalho não apenas promoveu

o levantamento de informações relevantes, mas também possibilitou a sistematização e o aprofundamento da análise do tema, destacando seu potencial e suas implicações para o futuro da geração de energia limpa.

Tabela 1: Principais trabalhos selecionados para análise bibliográfica.

Altor(es)/Ano	Título/Obra	Tema abordado	Objetivo principal	Relevancia para o tema
BARROZO (2012)	Introdução à Física Nuclear e de Partículas Elementares	Fundamentos da física nuclear	Explicar a base teórica da física nuclear e partículas.	Explicar a base teórica da física nuclear e partículas.
CNEN(2022)	História da Energia Nuclear	Desenvolvimento histórico	Descrever a evolução da energia nuclear no Brasil e no mundo.	Evidencia avanços e desafios históricos.
GOLDEMBERG (2015)	Energia e Sustentabilidade	Energia e meio ambiente	Analisar a relação entre energia e desenvolvimento sustentável.	Mostra equilíbrio entre uso energético e preservação.
MONTALVÃO (2012)	Energia Nuclear: Risco ou Oportunidade	Debate sobre riscos e benefícios	Discutir o papel da energia nuclear na sociedade.	Energia nuclear é segura se bem controlada.
TAVARES (2019)	80 anos da fissão nuclear	Avanços da fissão nuclear	Revisar 80 anos de uso da fissão.	Fissão é a fonte mais abundante e dominada.
TEIXEIRA et al. (2008)	O futuro da energia nuclear	Perspectivas futuras	Analisar desafios e perspectivas da energia nuclear.	Mostra importância da diversificação energética.
WILTGEN (2021)	Energia elétrica via fusão termonuclear controlada	Fusão nuclear	Estudar a viabilidade da fusão controlada.	A fusão é promissora, mas ainda experimental.
HALLIDAY;RESNICK; WALKER (2016)	Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna	Fundamentos físicos	Apresentar princípios e leis que explicam fenômenos nucleares.	Explicação teórica sólida de reações nucleares.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4 RESULTADOS

A presente seção apresenta os principais achados obtidos por meio da revisão bibliográfica realizada sobre o uso da energia nuclear como alternativa viável e sustentável na matriz energética global. Os dados foram tratados a partir de uma abordagem qualitativa, com foco na identificação, seleção e análise crítica de estudos científicos, relatórios técnicos e publicações especializadas. A análise considerou múltiplas perspectivas — técnicas, ambientais, econômicas e geopolíticas — permitindo uma compreensão abrangente dos benefícios, desafios e controvérsias que envolvem a adoção da energia nuclear como fonte limpa. Os resultados foram organizados em categorias temáticas, de modo a evidenciar os argumentos recorrentes na literatura e oferecer subsídios para uma reflexão fundamentada sobre o papel da energia nuclear na transição energética.

A energia nuclear tem sido amplamente discutida como uma alternativa viável para suprir a crescente demanda energética global, especialmente em um cenário onde a busca por fontes limpas e sustentáveis se tornou prioridade. Com base na análise que será realizada ao longo deste trabalho de conclusão de curso (TCC), espera-se que os resultados obtidos reforcem a importância da energia nuclear como uma solução estratégica para garantir a segurança energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Os dados que serão levantados devem indicar que, quando comparada a fontes tradicionais como carvão e petróleo, a energia nuclear tende a apresentar um impacto ambiental significativamente menor. As usinas nucleares não emitem dióxido de carbono durante o processo de geração de energia, o que contribui diretamente para a diminuição do efeito estufa e do aquecimento global. Além disso, a eficiência energética do processo de fissão nuclear demonstra um rendimento superior ao de outras alternativas renováveis, permitindo uma produção contínua e estável de eletricidade.

Outro aspecto relevante abordado nos resultados deste estudo é a disponibilidade de tecnologia para aprimorar a segurança das usinas nucleares. Sistemas avançados de resfriamento, materiais resistentes a acidentes e protocolos rigorosos de segurança têm sido desenvolvidos para minimizar os riscos associados à operação de reatores nucleares. Como resultado, a percepção pública sobre a energia nuclear como uma opção viável de energia limpa está gradualmente evoluindo, acompanhada por investimentos em pesquisa e inovação. Entretanto, apesar dos avanços e benefícios identificados, desafios como o gerenciamento de resíduos radioativos e os altos custos iniciais de implementação, como o espaço físico da usina (Figura 2) ainda representam barreiras para uma maior aceitação dessa matriz energética. Por

isso, os resultados deste estudo indicam que políticas públicas, regulamentações adequadas e desenvolvimento tecnológico são fundamentais para a consolidação da energia nuclear como parte da matriz energética sustentável do futuro. Dessa forma, este trabalho contribui para ampliar a compreensão sobre os impactos, desafios e benefícios da energia nuclear, reforçando sua relevância no contexto da transição energética global. A análise dos resultados que serão obtidos permitirá concluir que, com o planejamento adequado e avanços tecnológicos contínuos, a energia nuclear poderá desempenhar um papel fundamental na busca por fontes alternativas de energia limpa, ajudando a equilibrar a demanda energética e a preservação ambiental. (FGV,2023).

Figura 3:primeira usina nuclear do brasil, Angra 1.



Fonte: abdan. Disponível em: <https://abdan.org.br/2021/10/29/primeira-usina-nuclear-do-brasil-angra-1-so-tem-operacoes-garantidas-ate-2024/>. Acesso em 06 mai. 2023.

4.1 Energia nuclear: risco ou oportunidade

Em muitos países já há o banimento das usinas nucleares, como no caso da Alemanha, deve-se ponderar, entretanto, que isso não garante uma percepção de segurança aos alemães, haja vista que a vizinha França tem 78% de sua matriz de energia elétrica de base termonuclear e tende a aumentar essa proporção (TEIXEIRA, 2008), cabe às sociedades mundiais refletir sobre essa questão: de um lado, as crescentes necessidades energéticas dos países indicam a possível expansão da energia nuclear nos próximos anos; do outro lado, o risco que representam essas usinas, conforme percebido pela sociedade. Entretanto, esse debate não deve

desconsiderar os fatos objetivos, a evolução da tecnologia nuclear e a posição científica sobre os riscos efetivos representados por essas usinas. Podemos mencionar os três mais graves acidentes das usinas nucleares:

Three Mile Island, onde em 28 de março de 1979, um erro operacional e uma falha num equipamento de refrigeração provocaram a fusão parcial do núcleo de Three Mile Island. A manutenção preventiva havia sido prejudicada por cortes de custos e materiais de qualidade inferior haviam sido usados. Mas a causa principal do acidente foram as decisões erradas tomadas por operadores despreparados. A temperatura do núcleo subiu demais e a pressão aumentou. Uma válvula de redução de pressão abriu-se, mas não se fechou, ao contrário do que estava indicado. Isso provocou a liberação de enormes quantidades de água radioativa no rio Susquehanna. Gases radioativos também escaparam para a atmosfera. O governador do estado da Pensilvânia, onde se encontra a usina, demorou dois dias para iniciar a evacuação em um raio de 8 km ao redor da instalação nuclear;

Fukushima é uma usina de água fervente (BWR),. Foi dimensionada para suportar um terremoto de 8,1 na escala Richter, numa área notoriamente suscetível a terremotos de grande proporções. Foi dimensionada para suportar maremotos de até 5,7 metros de altura. O maior terremoto da história do Japão, ocorrido em 11 de março de 2011, teve intensidade de 9,2 na escala Richter e gerou um maremoto de mais de 14 metros de altura. A usina de Fukushima, equivocadamente, não havia sido dimensionada para suportar desastres naturais dessa intensidade. O maremoto encobriu e inundou as instalações nucleares e provocou o desligamento do sistema de resfriamento do núcleo. Os reatores 1, 2 e 3 sofreram fusão parcial, com liberação de hidrogênio – gás altamente combustível – pela oxidação das varetas, seguida de implosão dos edifícios onde estão os reatores nucleares pela queima do hidrogênio. Houve vazamento de água radioativa para o mar e liberação de gás radioativo na atmosfera;

Chernobyl: no início da madrugada do dia 26 de abril de 1986, aproveitando um desligamento de rotina da usina de Chernobyl, foram realizados alguns testes para observar o funcionamento do reator à baixa energia. Os técnicos encarregados desses testes não seguiram as normas de segurança e pelo fato de o moderador de nêutrons ser à base de grafite (em desuso no mundo), o reator poderia apresentar instabilidade num curto período de tempo, e foi isso que ocorreu; as pessoas foram alertadas 30 horas depois do acidente, até então tudo foi mantido em segredo, apenas cinco trabalhadores da usina sobreviveram ao acidente; os fatos mostram que o acidente de Chernobyl, que alcançou o grau máximo de gravidade de incidente nuclear, ocorreu por uma conjugação de três eventos, destacados acima; falha humana, numa usina com tecnologia ultrapassada (tendo o grafite como moderador), e a irresponsabilidade do governo,

que não evacuou a região do acidente em tempo hábil. Nas usinas modernas, esse acidente não seria possível.

Um dos pontos que mais embargam o uso da energia nuclear é o lixo gerado por esta matriz energética. Barrozo (2012) destaca que os resíduos radioativos possuem alta toxicidade e requerem armazenamento seguro por milhares de anos devido ao seu longo período de decaimento. De forma semelhante, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (2022) enfatiza que o manejo inadequado desses rejeitos representa risco significativo à saúde e ao meio ambiente, podendo causar efeitos biológicos mesmo em exposições a baixas doses. Complementarmente, Halliday Resnick e Walker (2016) explicam que a radiação ionizante proveniente desses materiais pode provocar mutações celulares e aumentar a probabilidade de desenvolvimento de câncer em organismos expostos. Tecnicamente, o rejeito é todo o material resultante de atividade humana que contém elementos radioativos com risco à saúde e ao meio ambiente e para o qual não se recomenda a reutilização. O lixo radioativo é dividido em 3 partes: o de baixo nível de radiação, de nível intermediário, e o de alto nível de radiação, dentre as formas de descarte e armazenamento podemos mencionar a compactação, encapsulamento em concreto e cimento, armazenamento em superfície e incineramento nos resíduos de baixa nível; solidificação, armazenamento em tambores blindados, depósitos subterrâneos e monitoramento contínuo nos resíduos de médio nível; piscinas de resfriamento, armazenamento seco, depósitos geológicos profundos e não são destruídos (pois não há segurança) nos resíduos de alto nível (ANDRADE, 2023). Felizmente, a maioria dos países como o Brasil possui firme compromisso de gestão de resíduos nucleares, seguindo os padrões internacionais de segurança, investindo em pesquisas para o desenvolvimento de tecnologias avançadas de tratamento e armazenamento de resíduos nucleares e implementando cada vez mais a eficiência do programa, essencial para garantir a proteção do meio ambiente natural e social. Nacionalmente compete à CNEN (*Comissão Nacional de Energia Nuclear*) a responsabilidade pela fiscalização e estabelecimento de diretrizes para o armazenamento, transporte e descarte desses materiais. Destaca-se que o país possui instalações apropriadas para o armazenamento temporário de resíduos radioativos, além de estar permanentemente aprimorando as soluções de longo prazo para descarte final.

Com base no exposto, tiramos algumas conclusões que servem para separar verdades científicas dos mitos e das ideologias, tão nocivas para o desenvolvimento da ciência de qualidade e para a correta formulação de políticas públicas; como que a radiação produzida pela fissão nuclear nos corações dos reatores é potencialmente letal para a vida, mas ainda não há consenso científico que dimensione as reais consequências da radiação ionizante a longo prazo;

pesquisas mais profundas sugerem que elas podem ser bem menos graves do que se costuma propagar. As usinas nucleares jamais se transformarão numa bomba atômica; enquanto as bombas atômicas têm uma concentração de urânio 235 (físsil) de 90%, a concentração do mesmo átomo nas usinas nucleares é de apenas 3% (misturado em 97% de urânio 238, não físsil), uma usina nuclear nunca produzirá uma reação nuclear em cadeia estável, como nas bombas atômicas. Podem ocorrer explosões nas usinas nucleares, mas elas são devidas à produção de hidrogênio no interior do núcleo, que é um gás altamente combustível. O impacto dessa explosão é local. O perigo (ainda não corretamente dimensionado pela ciência de qualidade) reside no espalhamento da radiação liberada, que pode ser levada pelas águas ou pelos ventos. Políticas públicas devem levar em consideração as conclusões tiradas pela ciência de qualidade, filtrando os resultados que tenham questionamentos de outros cientistas, aguardando os resultados do desenvolvimento científico das novas tecnologias.

Podemos dizer que os acidentes nucleares têm semelhança com os acidentes aéreos, no sentido de que a busca incessante das causas dos acidentes serve de instrumento de melhora da segurança de todos os voos. Desde Chernobyl não ocorreram acidentes resultantes de falhas humanas ou de manutenção. Apesar da moratória tácita de construção de novas usinas nucleares desde o acidente na Ucrânia, as usinas antigas continuam funcionando com segurança. O acidente de Fukushima certamente não teria ocorrido se a usina estivesse na Europa Central ou no Brasil, pois não são áreas passíveis de terremotos e/ou de maremotos deles decorrentes. O que houve lá foi um erro de projeto de uma usina instalada em área de grande risco.

No final da década de 2010, o acréscimo de potência instalada para suprir as necessidades energéticas do país foi de 10.000 MW por ano, quase uma Itaipu por ano (MONTALVÃO, 2012), já que um indicador de desenvolvimento de um país é seu consumo de energia elétrica per capita. Nesse aspecto, cada brasileiro consome cerca de cinco vezes menos do que o consumidor dos EUA e três vezes menos do que o consumidor europeu. Há um enorme espaço para o crescimento da nossa demanda por energia e o Brasil continuará a necessitar de muita energia para sustentar tanto o crescimento vegetativo da população quanto a melhoria no seu poder aquisitivo, que pressiona para cima o consumo per capita de energia.

Outro aspecto importante é a segurança energética como exemplo deve-se buscar o Brasil, sabendo que essa segurança só é assegurada por fontes passíveis de armazenamento. Para uma segurança energética dos países, é necessário que a energia seja armazenada para uso em momentos de carência periódica de energia ou em face do caráter aleatório da demanda. Atualmente, só as fontes convencionais oferecem essa segurança. Seus combustíveis – água, carvão, derivados de petróleo, gás natural, pastilhas de urânio – podem ser armazenados, a custo

baixo, em torno das plantas de produção de energia. Derivados de petróleo, carvão e gás podem todos ser estocados ao lado das usinas termoeletricas, para produzir energia sempre que os consumidores demandarem. As hidrelétricas produzem energia renovável, e sua forma de armazenar energia – água em seus reservatórios – é relativamente a mais barata quanto maiores os reservatórios. No entanto, a construção de grandes reservatórios pode envolver desafios ambientais e sociais, como o deslocamento de comunidades e impactos na biodiversidade como veremos mais adiante; as pastilhas de urânio são utilizadas como combustível nuclear em usinas nucleares, elas são inseridas em varetas metálicas que formam os elementos combustíveis dentro do reator, quando essas pastilhas são submetidas à fissão nuclear, liberam uma enorme quantidade de energia térmica, que aquece a água e gera vapor, esse vapor movimentando turbinas, produzindo eletricidade, podendo ser usadas no momento requerido, nas usinas termonucleares.

Quando as análises projetadas até 2030, vislumbrou-se o esgotamento dos potenciais de energia hidráulica após 2020 (MONTALVÃO, 2012), o que impôs uma expansão da oferta de eletricidade de base térmica, que é a mais cara porque as usinas termelétricas dependem da queima de combustíveis fósseis, como carvão, gás natural e óleo diesel, esses materiais têm preços variáveis e podem ser afetados por fatores como demanda global e câmbio, comparadas a fontes renováveis, como hidrelétricas e eólicas, as termelétricas têm menor eficiência na conversão de energia, o que aumenta os custos de produção, a emissão de gases poluentes exige investimentos em tecnologias para controle ambiental, o que também encarece a operação, muitas vezes, as termelétricas são acionadas apenas quando há escassez de outras fontes, como em períodos de seca, isso significa que operam de forma intermitente, o que eleva os custos de manutenção e operação. Deve-se ressaltar novamente que biomassa, eólica e solar não são fontes aceitáveis para a expansão, porque não propiciam segurança energética. São apenas fontes complementares. É preciso que os tipos de geração de energia elétrica sejam revistos (MONTALVÃO, 2012).

4.2 Urânio: fonte de energia

Existem dois tipos mais conhecidos de isótopos (átomos com o mesmo número de prótons) de urânio: o urânio-235 e o urânio-238. Inicialmente, o urânio é extraído de pedreiras ou minas, sendo encontrado em uma mistura com outros elementos. O mineral bruto contém apenas cerca de 0,3% de urânio. Após a extração, o urânio é separado dos outros minerais, e o que sobra é o óxido de urânio, conhecido como "yellow cake" (bolo amarelo) (DA SILVA,

2018). Posteriormente, o óxido de urânio é convertido em um composto gasoso, o hexafluoreto de urânio.

O urânio-238 apresenta uma proporção de 99,3%, enquanto o urânio-235 corresponde a apenas 0,7% (em valores aproximados). Para que ocorra fissão em nível de um reator nuclear, é necessário aumentar a porcentagem de urânio-235 para, no mínimo, 3%. Esse processo de enriquecimento é realizado por meio de várias técnicas, como a difusão gasosa, ultracentrifugação (em escala industrial), jato centrífugo (em escala de demonstração) e processos a laser (em fase de pesquisa). O objetivo é aumentar a concentração de urânio-235, que possui um núcleo fissil. Para a construção de uma bomba atômica, é necessário um enriquecimento de ao menos 90% de urânio-235.

A utilização do urânio como fonte de energia limpa na matriz energética para a geração elétrica tem sido uma opção estratégica em 33 países. Atualmente, existem 436 usinas nucleares em operação no mundo, representando uma capacidade instalada de 391 GW e gerando cerca de 10% de toda a eletricidade produzida globalmente. Além disso, há 58 usinas nucleares em construção, somando aproximadamente 60 GW de capacidade adicional. A maioria dessas novas usinas está localizada na Ásia – Extremo Oriente –, mas também há projetos na Europa, América do Norte e África (GUIMARÃES, 2023).

Uma usina nuclear é uma instalação projetada para gerar energia elétrica utilizando o processo de fissão nuclear. Nesse processo, o núcleo de um átomo pesado, como o urânio-235 ou o plutônio-239, é dividido em núcleos menores, liberando uma quantidade significativa de energia térmica. Para que esse processo ocorra, é utilizado o combustível nuclear, geralmente composto por urânio enriquecido. Esse combustível é moldado em pequenas pastilhas cerâmicas, que são empilhadas dentro de varetas metálicas e agrupadas em conjuntos chamados de elementos combustíveis. Esses elementos combustíveis formam o núcleo do reator nuclear. O reator nuclear é o componente principal da usina. Dentro do reator, a fissão ocorre e gera calor. O núcleo do reator contém os elementos combustíveis e é onde a reação nuclear é controlada através de barras de controle, feitas de materiais que absorvem nêutrons, como o boro e o cádmio. Essas barras são inseridas ou retiradas do núcleo para ajustar a velocidade da reação. Além disso, o reator possui um moderador, que pode ser feito de água leve (H_2O) é a água comum que usamos no dia a dia, em reatores nucleares, ela pode ser usada para resfriar o núcleo e moderar os nêutrons, ajudando a manter a reação em cadeia, reatores de água leve geralmente requerem urânio enriquecido para funcionar de forma eficiente.), água pesada (D_2O) contém deutério, um isótopo do hidrogênio com um nêutron extra, ela é usada em alguns tipos de reatores, como os reatores CANDU (Canadian Deuterium Uranium) são um tipo de

reator nuclear de água pesada pressurizada (PHWR) desenvolvido no Canadá porque permite o uso de urânio natural sem necessidade de enriquecimento, a água pesada é mais cara, mas oferece vantagens na economia de nêutrons e na eficiência do combustível.) ou grafite, cuja função é reduzir a velocidade dos nêutrons e facilitar a ocorrência de novas fissões. O tempo de vida útil do urânio em uma usina nuclear sendo o período em que o combustível permanece ativo dentro do reator antes de ser substituído, é em geral de aproximadamente de três a cinco anos, dependendo do tipo de reator e da estratégia de operação adotada. Durante esse intervalo, o urânio sofre fissão nuclear, liberando energia para a geração de eletricidade. Após esse período, o material perde eficiência e é removido do núcleo do reator, sendo substituído por novos elementos. Portanto, o ciclo de vida do urânio como combustível é limitado e requer planejamento contínuo para garantir o funcionamento seguro e eficiente da usina.

4.2.1 Radiação TCherenkov

No contexto da água pesada (D_2O), esse composto químico é particularmente relevante em reatores nucleares e detectores de partículas, como os utilizados para identificar neutrinos. Quando a luz atravessa um meio como a água, sua velocidade diminui. Isso permite que partículas carregadas se movam mais rápido do que a luz nesse meio, embora ainda estejam abaixo da velocidade da luz no vácuo. Ao se deslocarem, essas partículas excitam as moléculas ao redor, que posteriormente liberam radiação eletromagnética ao retornar ao seu estado fundamental. As ondas geradas se propagam esfericamente, mas quando a velocidade da partícula ultrapassa a da luz no meio, ocorre uma soma dessas ondas, formando uma radiação em um ângulo específico, conhecida como radiação de TCherenkov. O fenômeno é similar ao choque de ondas de um jato supersônico, que cria um cone de pressão no ar.

Os primeiros indícios desse efeito surgiram nos experimentos de Pierre e Marie Curie em 1900 com rádio. No entanto, foi somente em 1934 que Pavel TCherenkov o detectou experimentalmente, levando à nomeação da radiação em sua homenagem. Posteriormente, em 1937, os cientistas Igor Tamm e Ilya Frank desenvolveram uma teoria que descreve o fenômeno (TAKEDA, 2018). A radiação de TCherenkov possui diversas aplicações, incluindo Biomedicina utilizada para identificar pequenas concentrações de biomoléculas, com crescente interesse nessa área. Astrofísica empregada na análise de raios cósmicos, contribuindo para experimentos como IceCube, SNO, VERITAS e HESS. Também auxilia na determinação de

propriedades de objetos astronômicos emissores de raios gama, como restos de supernovas. E em reatores nucleares como já observamos: Serve para detectar partículas altamente energéticas. Sua intensidade está diretamente ligada à frequência dos eventos de fissão, permitindo a medição da atividade da reação nuclear.

4.3 Indução Eletromagnética e sua Aplicação na Geração de Energia Nuclear

A indução eletromagnética, descoberta por Michael Faraday em 1831, é um fenômeno fundamental da física que descreve como uma corrente elétrica pode ser gerada em um condutor pela variação de um campo magnético. Faraday observou que ao movimentar um ímã próximo a uma bobina de fio, surgia uma corrente elétrica, estabelecendo assim a base para a geração de eletricidade moderna. Esse princípio é descrito pela Lei de Faraday, que afirma que a força eletromotriz induzida em um circuito é proporcional à taxa de variação do fluxo magnético que o atravessa (LAGE, 2021). Nas usinas nucleares, esse conceito é aplicado de forma essencial. O processo começa com a fissão de átomos de urânio ou outro material radioativo, que libera uma grande quantidade de calor. Esse calor é usado para aquecer água e transformá-la em vapor, que por sua vez movimenta turbinas mecânicas. As turbinas estão acopladas a geradores que funcionam com base na indução eletromagnética: ímãs giram próximos a bobinas de cobre, criando um campo magnético variável que induz corrente elétrica. Dessa forma, a energia térmica gerada pela reação nuclear é convertida em energia elétrica utilizável, graças ao princípio descoberto por Faraday. Esse processo é o coração da geração de energia em diversas fontes, incluindo hidrelétricas, termoeletricas e, claro, usinas nucleares.

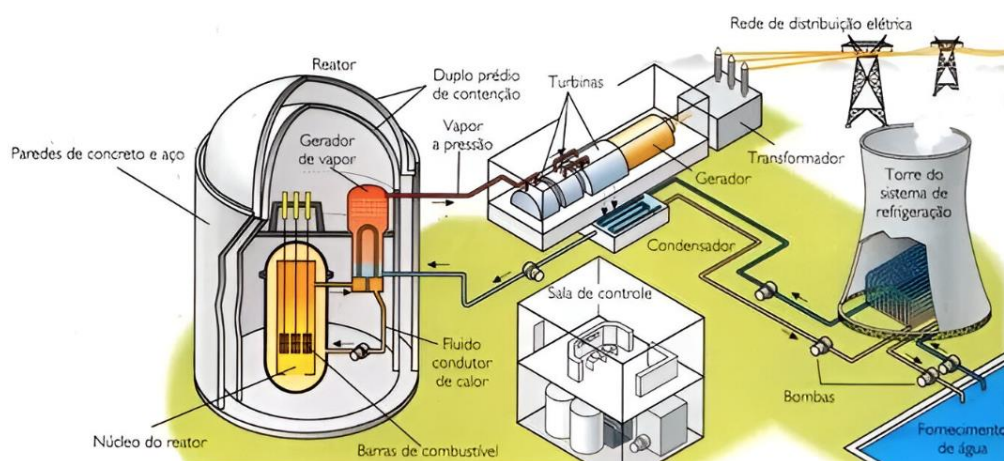
4.4 Princípios gerais de funcionamento de uma usina nuclear

Para compreender os princípios gerais de funcionamento de uma usina nuclear, é importante entender como ocorre a conversão da energia liberada nas reações de fissão em eletricidade. O processo inicia-se dentro do reator, onde o calor gerado no núcleo é transferido para o refrigerante, que geralmente é água ou gás. Esse fluido transporta o calor do núcleo para outras partes da usina, onde ele é utilizado para gerar vapor. Existem diferentes tipos de reatores nucleares, como o Reator de Água Pressurizada (RAP), onde a água do núcleo é mantida sob alta pressão para evitar que ferva, e o Reator de Água Fervente (RAF), onde a água do núcleo

ferve diretamente, gerando vapor. O vapor produzido no reator é conduzido para as turbinas da usina. As turbinas transformam a energia térmica do vapor em energia mecânica. Essa energia mecânica é, então, convertida em energia elétrica pelos geradores, que funcionam com base na indução eletromagnética. Após passar pelas turbinas, o vapor é resfriado em um condensador, retornando ao estado líquido. Essa água é recirculada para o reator, completando o ciclo de operação. Além dos componentes principais da usina, existem sistemas de segurança rigorosos para evitar acidentes e proteger o meio ambiente. A estrutura de contenção primária, feita de aço e concreto, envolve o reator e previne qualquer liberação de radiação para o ambiente externo. Sistemas de resfriamento de emergência garantem que o núcleo permaneça resfriado em caso de falhas, enquanto sensores e sistemas automatizados monitoram continuamente o funcionamento da usina (FREITAS JUNIOR, 2023). A figura (Figura 4) apresentada ilustra de forma detalhada o funcionamento de uma usina nuclear do tipo Reator de Água Pressurizada (RAP). O processo tem início no núcleo do reator, onde se encontram as barras de combustível compostas por pastilhas de dióxido de urânio (UO_2). Nesse local ocorre a fissão nuclear, processo que libera uma grande quantidade de calor. Esse calor é transferido para o fluido condutor de calor, também chamado de refrigerante, que circula em um circuito primário fechado, mantido sob alta pressão para evitar a ebulição da água. O fluido aquecido segue então até o gerador de vapor, onde transfere sua energia térmica para a água de um circuito secundário, produzindo vapor em alta pressão. O vapor gerado é conduzido para as turbinas, onde sua energia térmica é convertida em energia mecânica de rotação. Essa rotação movimenta o gerador, que transforma a energia mecânica em energia elétrica. Em seguida, essa energia é encaminhada ao transformador e, posteriormente, à rede de distribuição elétrica. Após movimentar as turbinas, o vapor é direcionado ao condensador, onde é resfriado e convertido novamente em água líquida. O processo de resfriamento é realizado com o auxílio da torre do sistema de refrigeração quando a usina está localizada em regiões com recursos hídricos limitados, como rios ou lagos pequenos, que recebe água de uma fonte externa (em usinas como Angra 1 e Angra 2, situadas no litoral do Rio de Janeiro, dispõem torres de resfriamento, elas utilizam diretamente a água do mar, que é abundante, para absorver o calor do sistema por meio de trocadores de calor). Essa água é bombeada continuamente, garantindo o fechamento do ciclo. Todo o sistema é controlado e monitorado a partir da sala de controle, responsável por assegurar o funcionamento estável e seguro da usina. O reator e o gerador de vapor estão protegidos por um edifício de contenção formado por paredes de concreto e aço, projetadas para impedir o vazamento de radiação e garantir a segurança tanto dos operadores quanto do meio ambiente. Os resíduos gerados pela fissão nuclear, conhecidos como lixo radioativo, são

cuidadosamente tratados e armazenados em conformidade com padrões internacionais de segurança. Esses resíduos são classificados em baixo, médio e alto nível de radiação, como já mencionado. Assim, o funcionamento de uma usina nuclear é um processo complexo que envolve a geração de energia térmica por meio da fissão nuclear, a conversão dessa energia em eletricidade e um sistema de segurança robusto para proteger o meio ambiente e garantir a eficiência da operação. Essa tecnologia continua a ser uma opção estratégica para atender às demandas crescentes de energia, proporcionando benefícios significativos para a sociedade.

Figura 4: funcionamento de uma usina nuclear.



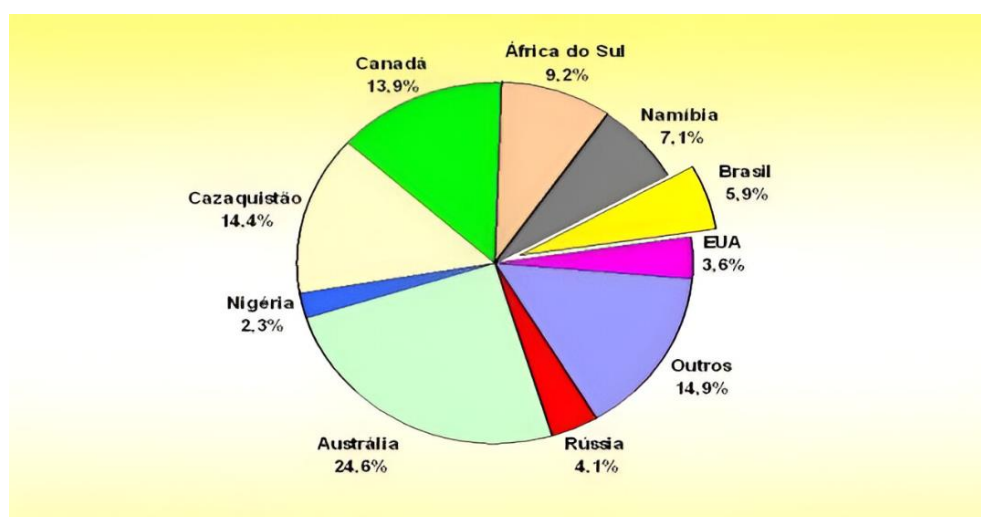
fonte: Coladaweb. Disponível em: <https://Coladaweb.com/usinas-nucleares>. Acesso em 06 de mai. 2023.

O Brasil detém a sexta maior reserva de urânio do mundo, tendo prospectado apenas uma parte de seu território (GUIMARÃES, 2023). Essas reservas abundantes conferem ao país uma vantagem competitiva estratégica de autossuficiência, permitindo sua exploração tanto para a produção de energia elétrica doméstica quanto para a exportação do excedente desse recurso sob a forma de concentrado de urânio ("yellow cake"), hexafluoreto de urânio natural e enriquecido, óxido de urânio e urânio metálico. Além de não depender de importação, a exportação de urânio e outros produtos relacionados à indústria nuclear pode trazer benefícios econômicos significativos, fortalecendo a balança comercial brasileira e possibilitando parcerias internacionais e colaborações científicas para impulsionar o desenvolvimento tecnológico e industrial do setor nuclear nacional.

É importante destacar que alguns países, como Estados Unidos, Rússia e Brasil, possuem grandes reservas de urânio, não as maiores, mas possuem o domínio tecnológico do processo de fabricação de combustível e experiência na construção e operação de usinas

nucleares. Esses são requisitos fundamentais para alcançar a plena autossuficiência no setor nuclear (Figura 4). No entanto, a capacidade de produção do Brasil ainda é insuficiente e requer investimentos em sua expansão para atender plenamente à demanda e gerar excedentes exportáveis. Nesse cenário com o avanço da tecnologia e o aumento da demanda por energia, o Brasil tem a oportunidade de se consolidar como um líder global no setor nuclear, aproveitando suas reservas abundantes de urânio e investindo em infraestrutura e pesquisa para expandir sua capacidade de produção e exportação. Essa estratégia pode contribuir para o desenvolvimento sustentável do país, garantindo segurança energética e promovendo o crescimento econômico.

Figura 5: Gráfico das reservas mundiais de Urânio.

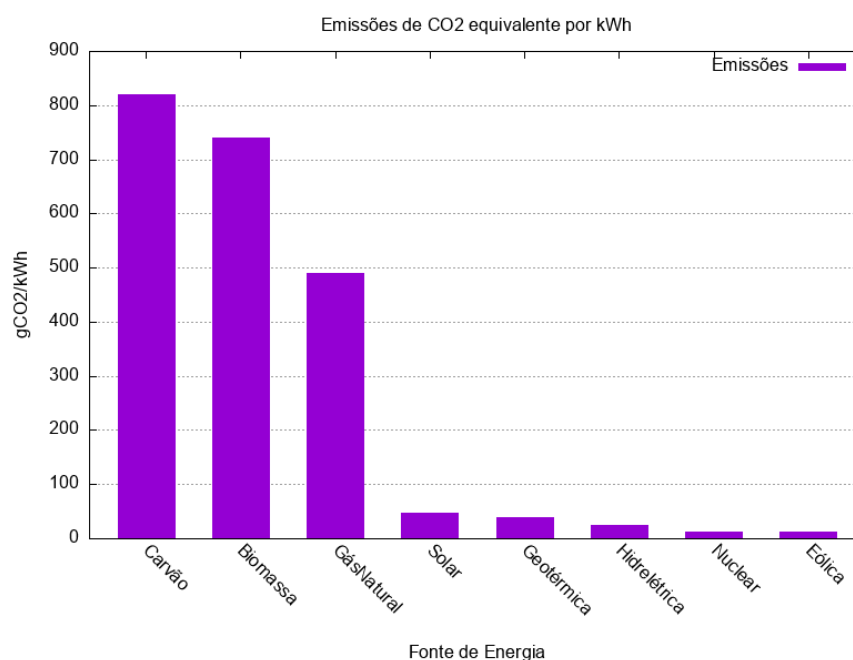


Fonte: Sindicatodaindustria. Disponível em: <https://Sindicatodaindustria.com.br/Brasilsepreparapara2ºfasedoenriquecimentodourânio>. Acesso em: 06 mai. 2023.

4.5 Desafio da energia nuclear para ser considerada como energia limpa

Energia nuclear não é limpa do ponto de vista literal, como veremos mais adiante. Tal fonte de energia não existe, mas a nuclear é a mais vantajosa na questão da harmonia que deve haver entre frear as emissões de gases do efeito estufa e manter a segurança energética que o mundo contemporâneo necessita. As usinas nucleares não emitem gases de efeito estufa durante a operação e, ao longo de seu ciclo de vida, a energia nuclear produz aproximadamente a mesma quantidade de emissões equivalentes a dióxido de carbono por unidade de eletricidade que o vento e um terço das emissões por unidade de eletricidade quando comparada com a energia solar, como vemos no gráfico (Figura 5).

Figura 6: Gráfico das emissões de dióxido de carbono da eletricidade.



fonte: adaptada de world-nuclear.org.

4.5.1 Mudanças climáticas

As mudanças climáticas podem ocorrer naturalmente devido a variações na radiação solar e modificações na órbita terrestre. No entanto, segundo o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) há uma certeza de 90% de que o aumento da temperatura global nos últimos 250 anos tem sido impulsionado pela atividade humana. Entre os impactos ambientais causados pelas ações humanas, destacam-se as transformações no uso da terra devido à agricultura, e a emissão como já mencionado de CO₂ por combustíveis fósseis e outras atividades, além da alteração no albedo terrestre — a quantidade de radiação solar refletida de volta ao espaço. Essas mudanças afetam o equilíbrio energético que regula a temperatura do planeta. As interferências humanas nos ecossistemas são vastas, e cada vez mais podemos identificar os efeitos das mudanças climáticas globais em eventos extremos, como chuvas intensas ou longos períodos de seca. Com isso, estamos transformando profundamente o planeta, por meio de processos que a ciência ainda busca compreender completamente (GOLDEMBERG, 2015.).

4.5.2 Energia nuclear como fonte viável de eletricidade

Como a energia nuclear é confiável e pode ser implantada em larga escala, ela pode substituir diretamente as usinas de combustíveis fósseis, evitando a combustão desses combustíveis para geração de eletricidade, a redução de emissões proporcionada pela energia nuclear corresponde à remoção de cerca de 400 milhões de veículos das vias públicas anualmente (ONU.2019). A sociedade moderna está se tornando cada vez mais dependente da eletricidade, com a demanda aumentando constantemente à medida que o transporte, o aquecimento doméstico e os processos industriais são cada vez mais eletrificados. Embora a eletricidade seja limpa no ponto de uso, sua geração atualmente produz mais de 40% de todas as emissões de carbono relacionadas à energia (ONU.2019). A descarbonização do fornecimento de eletricidade, ao mesmo tempo em que fornece eletricidade acessível e confiável para uma população global crescente, deve ser fundamental para qualquer estratégia de mudança climática. A energia nuclear mostrou que tem potencial para ser o catalisador para a realização de transições energéticas sustentáveis, muito antes de a mudança climática estar na agenda. A França gera mais de 78% de sua eletricidade a partir da energia nuclear — a maior parcela nuclear de qualquer país do mundo — e suas emissões do setor elétrico são um sexto da média europeia. Em cerca de 15 anos, a energia nuclear deixou de desempenhar um papel menor no sistema elétrico francês para produzir a maior parte de sua eletricidade, mostrando que a energia nuclear pode ser expandida na velocidade necessária para combater efetivamente as mudanças climáticas.

Devem ser implantadas todas as tecnologias que possam contribuir para a solução de um dos maiores desafios da humanidade. Não podemos esperar, pois os impactos das mudanças climáticas atingirão primeiro os mais pobres e vulneráveis, e deixar de agir terá consequências humanitárias significativas. A indústria nuclear reconhece a escala e o imediatismo do desafio e o importante papel que todas as fontes de energia de baixo carbono devem desempenhar. Uma iniciativa da indústria global de energia nuclear, chamada Harmony, tem como objetivo fornecer 25% da eletricidade global antes de 2050 como parte de um mix de baixo carbono, limpo e confiável. Assim, podemos construir um mundo mais limpo e verdadeiramente sustentável.

A energia proveniente de combustíveis fósseis tornou-se, compreensivelmente, o alvo principal dos ambientalistas nas últimas décadas. No entanto, é importante reconhecer que as empresas de petróleo e gás não são as únicas culpadas, pois todos os tipos de produção de

energia causam danos ambientais de uma forma ou de outra. A narrativa de energia "limpa", frequentemente promovida por defensores da energia renovável, pode não ser tão limpa quanto se imagina. Poderíamos classificá-las de forma mais coerente como fontes de energia "suja" e "menos sujas" (COSTA, 2019). As fontes de energia suja são bem conhecidas: as fontes não renováveis, como petróleo e seus derivados, carvão mineral e gás natural, que são os principais vilões na emissão de gases do efeito estufa (GEE). Também nesta classificação, é considerada a energia produzida por minerais radioativos, devido ao fato de não ser renovável. Já as fontes menos sujas são as fontes renováveis provenientes do sol, do vento, da água e da biomassa. Dependendo de como é produzida a energia elétrica a partir dessas fontes renováveis, elas podem se tornar menos ou mais sujas. A produção centralizada, em grandes usinas, parques e centrais, é considerada mais suja, enquanto a produção descentralizada de energia, como em telhados, ocupando pequenas áreas, é considerada menos suja. Essa nomenclatura corresponde ao que realmente acontece na prática ao analisar a geração centralizada e a geração descentralizada. No caso da geração centralizada, as boas práticas socioambientais foram abandonadas por algumas empresas que se dedicam ao negócio do vento e do sol.

A energia eólica é considerada a fonte de energia renovável mais atrativa comercialmente sob as condições atuais do mercado. Por outro lado, o ruído gerado pelas turbinas pode ser um impacto tangível no ambiente. As plantas eólicas atingem um nível de pressão sonora de 90-100 decibéis. Os ruídos sonoros podem provocar mudanças no funcionamento do organismo, impactando os sistemas nervoso, digestivo, endócrino e respiratório, além disso, pode desencadear efeitos psicológicos e psiquiátricos, interferindo na saúde mental e emocional, nas populações próximas a parques eólicos (GOMES, 2016). Em média, cada turbina mata de 1 a 15 aves migratórias por ano, dependendo das condições e da tecnologia utilizada. Só na Escócia, estima-se que entre 40.000 e 50.000 papagaios-do-mar sejam afetados, além do desmatamento nas áreas onde as usinas são instaladas (CUNHA, 2020).

Quando se trata de segurança aviária, a energia solar tem uma reputação igualmente preocupante. Estudos estatísticos indicam que a mortalidade de aves associada a usinas solares é superior à registrada em usinas eólicas, corroborando essa hipótese com dados observacionais (BARBOSA, 2013). Os raios solares concentrados em usinas solares são bastante perigosos para pássaros, morcegos e insetos, que podem se inflamar no ar ao entrar em contato com essas vigas. Futuras usinas solares provavelmente serão equipadas com impedimentos acústicos ou quimiossensoriais para afastar pássaros ou morcegos, privando-os ainda mais de habitat. Ácidos ainda são usados para limpar a superfície dessas grandes fazendas solares, além disso, a instalação de usinas solares de grande porte leva, em muitos casos, à mudança dos padrões de

temperatura e precipitação, que por sua vez afetam negativamente os habitats naturais e levam à degradação do solo. Os painéis solares são feitos de materiais de terras raras, cuja extração na natureza gera um grande volume de partículas radioativas na atmosfera.

Embora os impactos negativos da energia hidrelétrica ainda não tenham sido completamente eliminados, especialistas têm desenvolvido estratégias eficazes para sua mitigação (CUNHA, 2020). A mortalidade de peixes diminuiu significativamente devido à implantação de estruturas como escadas de peixes e cascatas, que facilitam a migração e reduzem o impacto das barragens sobre a fauna aquática, além disso, medidas para melhorar a qualidade da água foram adotadas, como a injeção de oxigênio em diferentes profundidades e sistemas de aeração nas turbinas, garantindo níveis adequados de oxigênio dissolvido. Apesar desse progresso significativo, ainda estima-se que 2 a 3% dos peixes sejam esmagados pelas turbinas das hidrelétricas (CUNHA, 2020), além alagamentos de grandes áreas, destruição de habitats, emissão de gases de efeito estufa(pela decomposição da matéria orgânica submersa nos reservatórios), alteração do regime hídrico, assoreamento e erosão e deslocamento de populações (TERRIN, 2019).

4.6 A fusão nuclear: a chave para um futuro de energia limpa, segura e inesgotável, impulsionando o progresso sustentável da humanidade

A crescente necessidade de energia para sustentar a organização da sociedade moderna tem impulsionado a busca por fontes alternativas. As opções convencionais enfrentam diversas limitações, como já discutidas nesta monografia. Fontes fósseis (como carvão, petróleo e gás): possuem reservas finitas e causam impactos ambientais negativos. Fontes renováveis (como solar e eólica): apresentam desafios no armazenamento da energia gerada. Hidrelétricas: têm um potencial limitado e também podem gerar danos ambientais. Energia nuclear por fissão: a gestão dos resíduos radioativos ainda não tem solução ideal, e há sempre o risco de acidentes nucleares. Diante desse cenário, a fusão nuclear surge como uma alternativa promissora para gerar energia de forma mais limpa e abundante. Esse processo ocorre quando dois núcleos atômicos se unem para formar um novo núcleo, liberando energia na forma de movimento de nêutrons. Essa energia térmica é utilizada para aquecer a água, gerando vapor que movimenta turbinas conectadas a um gerador, convertendo a energia mecânica em eletricidade. A quantidade de energia gerada por unidade de massa na fusão é superior à fissão nuclear (DE SOUZA CRUZ, 1989), além disso os resíduos radioativos produzidos pela fusão nuclear têm,

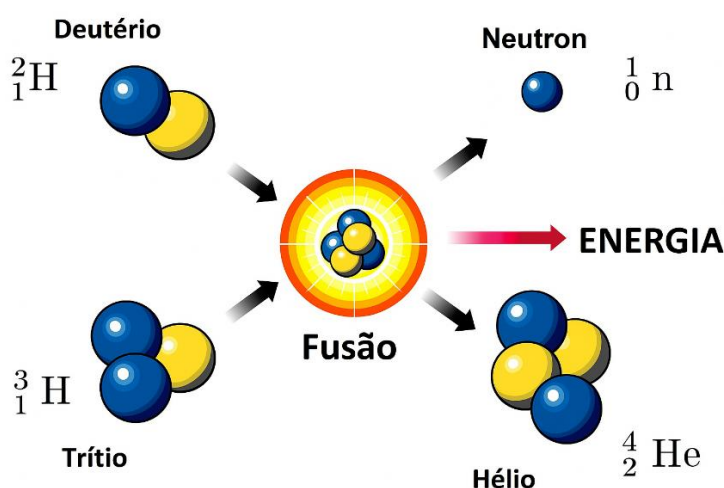
em geral, meia-vida relativamente curta — de algumas dezenas a centenas de anos — o que torna seu armazenamento mais viável em comparação com os resíduos da fissão nuclear.

4.6.1 Fusão nuclear

A forma mais comum de geração de energia no universo é a fusão nuclear, processo pelo qual as estrelas convertem seu combustível em energia. No interior das estrelas, a fusão nuclear transforma hidrogênio em hélio, unindo dois prótons para formar uma partícula alfa (um núcleo de hélio), enquanto libera dois pósitrons, dois neutrinos e uma quantidade imensa de energia. Apesar de ser um fenômeno natural no cosmos, a fusão nuclear apresenta enormes desafios tecnológicos para os cientistas aqui na Terra, tornando sua implementação extremamente complexa. Em contraste, a fissão nuclear—que consiste na divisão de um núcleo atômico—é um processo mais viável e acessível. Embora a fusão pareça um mecanismo simples, sua realização artificial exige avanços científicos significativos para ser viável em nosso planeta. O principal desafio para alcançar a fusão nuclear na Terra está relacionado à baixa gravidade do planeta. Essa condição exige temperaturas significativamente mais altas do que as encontradas no núcleo do Sol—algo em torno de 100 milhões de graus Celsius—para criar um ambiente adequado para a colisão dos átomos. Isso ocorre porque os átomos possuem uma barreira eletrostática bastante intensa, conhecida como Barreira de Coulomb. Sem superar essa barreira, a fusão entre dois átomos e a formação de um novo elemento tornam-se impossíveis. Para superar a barreira eletrostática, os átomos precisam atingir um alto nível de agitação térmica e estar dissociados em elétrons e íons, permitindo grande mobilidade cinética. Esse estado só é possível em temperaturas extremamente elevadas, onde a matéria se encontra na forma de plasma. No entanto, isso não basta. Para que as reações nucleares ocorram, é essencial manter essa temperatura por um tempo mínimo e garantir uma densidade adequada, aspectos que, juntos, formam as três condições simultâneas necessárias para viabilizar a fusão nuclear: temperatura, densidade e tempo de confinamento. Nesse cenário, a matéria atinge o estado físico de plasma, que é o quarto estado da matéria. A dificuldade adicional é que nenhum material terrestre pode suportar contato direto com temperaturas tão extremas. Para controlar o ambiente extremamente quente e em estado de plasma gerado durante a fusão nuclear, os cientistas recorrem a métodos avançados, como o uso de campos magnéticos intensos para confinar o plasma, ou a técnica de microimplosão de pequenos pellets, induzida por lasers de

altíssima potência.. No processo de fusão nuclear, dois átomos leves, como Deutério e Trítio (Figura 6), colidem em alta velocidade, carregando uma grande quantidade de energia cinética que produz um núcleo de hélio (ou partícula alfa) e um nêutron de alta energia. Essa energia é suficiente para superar a barreira eletrostática de Coulomb, que normalmente impede a fusão dos átomos ionizados, permitindo que eles se unam e formem um novo núcleo de hélio. Durante essa reação, ocorre a liberação de um nêutron e a emissão de uma quantidade imensa de energia. (WILTGEN, 2021).

Figura 7: Representação da reação de fusão de deutério (D) e trítio (T).



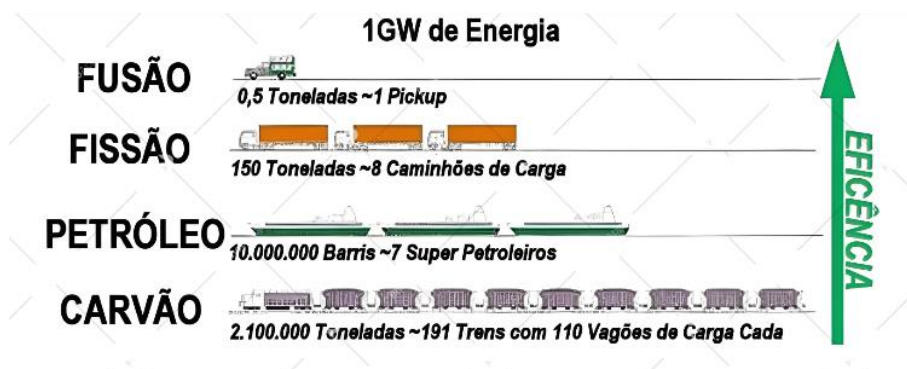
Fonte: engquimicasantosp. Disponível em: <https://www.engquimicasantosp.com.br/2012/12/fusao-frio.html>. Acesso em: 17 de mai. 2025.

4.6.2 Fusão nuclear: Breve histórico e promessa de energia limpa e mais eficiente em comparação com fissão e outras fontes

A fusão nuclear é um conceito muito mais antigo do que se imagina. Embora avanços tecnológicos e pesquisas mais sofisticadas tenham ganhado força a partir de 2010, esse fenômeno já era estudado há bastante tempo. Em 1920, o astrônomo Arthur Eddington (1882-1944) sugeriu a ocorrência da fusão nuclear em suas análises sobre modelos estelares. No entanto, somente na década de 1930 começaram os experimentos práticos para investigar esse fenômeno (CINTRA, 2024). Em 1932, os físicos Mark Oliphant, Paul Harteck e Ernest Rutherford realizaram o primeiro experimento bem-sucedido de fusão nuclear. Eles usaram um acelerador de partículas para colidir deutérios (isótopos pesados do hidrogênio, com um nêutron

e um próton) contra um alvo também contendo deutério. Quando essas partículas se chocaram em alta velocidade, ocorreu a fusão, produzindo hélio-3 e liberando um nêutron, dentre as dificuldades da época podemos mencionar: A energia necessária para iniciar a fusão era obtida por meio de aceleradores rudimentares; O processo consumia mais energia do que produzia, tornando-o inviável para geração de energia prática; A detecção dos produtos da fusão (como nêutrons) era desafiadora devido à falta de instrumentação precisa. A diferença fundamental entre o experimento de 1932 e os atuais está no controle, enquanto o primeiro foi uma prova de conceito breve e não sustentável, os reatores modernos buscam dominar a fusão como um processo contínuo e energeticamente lucrativo, em 1939 o físico Hans Bethe (1906-2005) explicou os mecanismos pelos quais a fusão ocorre naturalmente nas estrelas (RIBEIRO, 2014). Bethe demonstrou que as reações de fusão são altamente eficientes em termos energéticos (Figura 7.), o que impulsionou o interesse do governo e de empresas privadas na busca por soluções para gerar energia por meio desse processo. Por ser uma fonte de energia segura e abundante, a fusão nuclear passou a ser um campo de intensa pesquisa. Bethe foi responsável por identificar os processos que garantem a produção de energia nas estrelas, uma descoberta que lhe rendeu o Prêmio Nobel. Ele identificou dois ciclos principais: o ciclo Próton-Próton, predominante em estrelas menores como o Sol, e o ciclo CNO (carbono-nitrogênio-oxigênio), que ocorre em estrelas de maior porte. No ciclo CNO, um núcleo de carbono-12 reage com um núcleo de hidrogênio, formando nitrogênio-13 e liberando um raio gama. Já no ciclo Próton-Próton, dois núcleos de hidrogênio se combinam, dando origem ao deutério, com a liberação de um neutrino e um pósitron. Esse pósitron interage com outro núcleo de hidrogênio para formar trítio. Quando o ciclo se repete, dois núcleos de trítio interagem, resultando na formação de um núcleo de hélio e dois de hidrogênio.

Figura 8: Representação da eficiência energética da fusão nuclear.



Fonte: WILTGEN, 2021.

Com essas descobertas, iniciou-se uma corrida global para desenvolver e dominar essa tecnologia. Diversos laboratórios e equipamentos foram construídos ao redor do mundo, com o objetivo de viabilizar sua aplicação o mais rapidamente possível, já que representava uma das soluções mais promissoras para a geração de energia no futuro (WILTGEN, 2024). Entre os dispositivos criados, o mais notável e eficiente foi o reator russo Tokamak, que apresentou resultados positivos já na década de 1960. No final de 1993, a Universidade de Princeton conseguiu gerar 5,6 milhões de watts por meio de uma fusão controlada em seu reator Tokamak Fusion Test Reactor 2. Embora esse resultado fosse impressionante para a época, a quantidade de energia consumida no processo superou a energia produzida. Os estudos realizados naquele período focavam na fusão de dois núcleos para formar um novo, liberando energia cinética utilizada para aquecer a água. O vapor gerado impulsionava turbinas conectadas a um gerador, convertendo o movimento mecânico em eletricidade. Segundo as pesquisas, esse método de produção de energia é significativamente mais eficiente que a fissão nuclear e gera pouquíssimos resíduos radioativos. Apesar de compreenderem como produzir energia a partir da fusão nuclear, os cientistas ainda enfrentam desafios em diversas áreas, como física, tecnologia e questões sociais. Na área da física, a maior dificuldade está em alcançar o estado em que as partículas alfa se tornassem a principal fonte de energia para o plasma e compreender o comportamento do plasma ao ser aquecido e como ele se mantém estável. No campo tecnológico, como já mencionado a dificuldade está em desenvolver e testar um reator capaz de suportar as condições extremas necessárias para a geração e manutenção do plasma. Por fim,

do ponto de vista socioambiental, era essencial demonstrar que esse método de produção de energia é seguro para o planeta e benéfico para o meio ambiente.

Embora existam inúmeros protestos contra a construção de novas usinas de geração de energia elétrica, é curioso notar que eles partem de uma sociedade profundamente dependente do uso de dispositivos eletrônicos, como celulares, redes sociais, computadores e internet. Mesmo entre aqueles que criticam a expansão dessas infraestruturas, a eletricidade continua sendo uma necessidade fundamental para a humanidade como já discutimos. Somos consumidores incansáveis de energia elétrica. Ao longo das últimas décadas, avanços tecnológicos têm possibilitado a conversão de diferentes fontes de energia em eletricidade. As chamadas fontes renováveis modernas carregam a promessa de, no futuro, tornarem-se alternativas eficientes e essenciais para a produção energética global, nesse cenário a energia nuclear ressurge como uma solução estratégica.

5 CONCLUSÃO

A energia nuclear, quando considerada após o início de sua operação, é frequentemente mais econômica do que as usinas a carvão e gás natural, pois não incorpora os altos custos de capital e construção. No entanto, ao incluir esses custos iniciais, as novas usinas nucleares podem parecer menos competitivas em relação às usinas movidas a carvão e gás. As usinas a carvão apresentam custos intermediários entre as nucleares e as de gás, mesmo com os gastos adicionais para atender aos padrões de controle de emissões de dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x) nos países industrializados. Entretanto, caso no futuro as emissões de CO₂ sejam regulamentadas com custos associados, a energia nuclear poderá tornar-se uma alternativa mais vantajosa.

Os sistemas nucleares do futuro terão que oferecer flexibilidade em seus projetos e atender a diferentes perfis de proprietários, com usinas de vários tamanhos. Esses sistemas visam melhorar a eficiência do ciclo do combustível e reduzir custos por meio de inovações, tanto no design quanto nas técnicas de construção, como projetos modulares. Além de gerar energia, esses reatores poderão suprir demandas futuras, como produção de hidrogênio, dessalinização de água do mar e aquecimento urbano. Entre os países em desenvolvimento, há um interesse crescente em reatores de pequeno e médio porte, que demandam menores investimentos iniciais em comparação com os reatores maiores e se adequam melhor às redes energéticas locais. Além disso, tais reatores são mais facilmente adaptáveis a aplicações específicas, como aquecimento urbano e dessalinização de água. Muitos países já estão investindo no desenvolvimento desses reatores, que poderão ter alta demanda no futuro. Embora a energia nuclear seja uma tecnologia avançada, ela exige uma infraestrutura igualmente avançada. Cada nação precisa decidir sobre o tipo de sistema que deseja adotar, levando em conta questões cruciais, como: a infraestrutura necessária, o prazo para seu desenvolvimento e se ela será construída internamente ou em colaboração com outros países. Cada país deve avaliar essas questões e tomar decisões que atendam às suas necessidades específicas.

Diante do contexto atual, fica evidente que a energia nuclear ocupa um papel cada vez mais relevante na matriz energética global. Seu baixo impacto na emissão de gases do efeito estufa e o desenvolvimento contínuo de tecnologias mais seguras e eficientes reforçam sua importância como alternativa energética. A expansão desse setor, por meio de projetos como

os reatores da Geração IV, mostra o empenho de diversos países em garantir um fornecimento estável de energia e reduzir a dependência de fontes menos econômicas. O abastecimento adequado de urânio e o domínio do ciclo do combustível por algumas nações, como o Brasil, demonstram o potencial dessa fonte no cenário energético. Além disso, os investimentos previstos no Plano Nacional de Energia (PNE) 2030 e 2050 sinalizam um caminho claro para a diversificação da matriz elétrica brasileira, atualmente centrada na geração hidrelétrica. Assim, é essencial que os avanços na área nuclear continuem sendo debatidos com transparência e participação ampla da sociedade, sempre com foco na segurança, na sustentabilidade e na valorização do conhecimento técnico já consolidado.

Dessa forma, conclui-se que o objetivo proposto por este trabalho foi plenamente alcançado. A pesquisa possibilitou o aprofundamento do conhecimento acerca dos fundamentos teóricos e práticos relacionados à energia nuclear, proporcionando uma análise crítica e embasada sobre seu papel na transição energética contemporânea. Verificou-se que essa matriz energética apresenta elevado potencial de contribuição para a diversificação e a sustentabilidade do sistema energético, sobretudo em razão de sua alta densidade energética e de suas reduzidas emissões de gases de efeito estufa. Contudo, também se evidenciaram suas limitações, especialmente no que concerne à gestão dos resíduos radioativos e às questões de segurança operacional. Assim, o estudo apresentou uma abordagem equilibrada e fundamentada, permitindo uma compreensão mais clara e consistente das potencialidades e desafios da energia nuclear no contexto de um futuro energético sustentável.

6 REFERÊNCIAS

ANDRADE, Cicero Willame Fernandes de; PRADO, Walter Florestan S.; KNISS, Claudia Terezinha. Armazenamento dos elementos e rejeitos em usinas nucleares. Revista FT, v. 27, n. 123, jun. 2023. Disponível em: <<https://revistaft.com.br/armazenamento-dos-elementos-e-rejeitos-em-usinas-nucleares>>. Acesso em: 06 mai. 2025.

BARBOSA FILHO, Wilson Pereira; AZEVEDO, A. C. S. de. *Impactos ambientais em usinas eólicas*. In: AGRENER GD – SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 9., 2013, Itajubá. *Anais...* Itajubá: UNIFEI, 2013. p. 1-17. Disponível em: <<https://feam.br/documents/d/feam/ag-267-pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2025.

BARROZO, Petrucio. *Introdução à física nuclear e de partículas elementares*. São Cristóvão: CESAD, 2012. Disponível em: <https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/10252431032014Introducao_a_Fisica_Nuclear_e_de_Partículas_Elementares_aula01.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2025.

CINTRA, Giovanna Botelho. *Fusão nuclear: a energia do futuro*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/prefix/16919/1/22009373.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2025

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (Brasil). História da energia nuclear : apostila educativa. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/lapoc/pt-br/publicacoes/apostilas-educativas-cnec/historia-da-energia-nuclear.pdf>>. Acesso em: 4 abr. 2025.

COSTA, Heitor Scalabrini. Energia nuclear é limpa? *Ecodebate*, 2019. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2021/11/22/energia-nuclear-e-energia-limpa/>>. Acesso em: 6 maio 2023.

CUNHA, Celso. Os desafios e as oportunidades da utilização da energia nuclear no Brasil. *LAS/ANS*, 2020. Disponível em: <<https://las-ans.org.br/wp-content/uploads/2019/01/5-Celso-Cunha.pdf>>. Acesso em: 6 maio 2023.

DA SILVA, Samara Capitol; MIOTTO, Ronisson Paulo; CLEMENTE, Igor Magalhães. *Urânio no Brasil: uma análise sobre sua viabilidade energética no contexto atual*. 2018. Trabalho apresentado em evento acadêmico. Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA. Disponível em: <https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq_trabalhos/17419/seer_17419.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2025.

DE SOUZA CRUZ, Frederico Firmo; MARINELLI, José Ricardo; DE MORAES, Marilena Matiko Watanabe. Fusão nuclear em plasma. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 6, n. 1, p. 59-74, 1989. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7720>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

FGV - Coluna Opinião. Entrevistas com especialistas: as diferentes visões a respeito da energia nuclear no Brasil. *Fundação Getúlio Vargas*, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/fc0d566c-2fe6-46e4-971e-394d8f747fad/content>>. Acesso em: 6 maio 2023.

FREITAS JÚNIOR, Neilson. Sistema de funcionamento de usinas nucleares. *Revista FT*, [S. l.], 2023. Disponível em: <<https://revistaft.com.br/sistema-de-funcionamento-de-usinas-nucleares/>>. Acesso em: 06 mai. 2025

GOLDEMBERG, José. Energia e sustentabilidade. *Revista de Cultura e Extensão USP*, v. 14, p. 33-43, 2015. Disponível em: <<https://revistas.usp.br/rce/article/view/108256>>. Acesso em: 3 jul. 2025.

GOMES, Leonardo Rafael Teixeira Cotrim; ALVA, Juan Carlos Rossi. Impactos ambientais gerados pelos ruídos emitidos pelos aerogeradores situados nas proximidades de Morro do Chapéu no Estado da Bahia. Trabalho apresentado na Semana de Mobilização Científica da UCSAL(SEMOC), Salvador, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/358271443_IMPACTOS_AMBIENTAIS_GERADOS_PELOS_RUIDOS_EMITIDOS_PELOS_AEROGERADORES_SITUADOS_NAS_>

PROXIMIDADES_DE_MORRO_DO_CHAPEU_NO_ESTADO_DA_BAHIA>. Acesso em: 3 jul. 2025.

GUIMARÃES, Leonam dos Santos; BEZERRA, Luís Roberto; SILVA, Marcelo Gomes. Riqueza do urânio como fonte de energia limpa: por que não incluir nas propostas e programas para 2023 do MME? *Fundação Getúlio Vargas*, 2023. Disponível em: < <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/e6096be0-2bfb-4791-8076-e7aba64ac5d8/content> >. Acesso em: 1 jun. 2025.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

LAGE, Eduardo. A indução eletromagnética. *Revista Ciência Elementar*, v. 9, n. 01, p. 018, 2021. Disponível em:< <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/static/docs/artigos/2021-018.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2025.

MARTINS, Roberto Vieira. Como Becquerel não descobriu a radioatividade. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 7, n. 1, p. 27-45, 1990. Disponível em:< <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7720>>. Acesso em: 3 jul. 2025.

MONTALVÃO, Edmundo. Energia nuclear: risco ou oportunidade. *Livro Aberto IBICT*, 2012. Disponível em: < <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/123456789/604/1/energia%20nuclear%20risco.pdf>>. Acesso em: 6 maio 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU abre primeira conferência internacional sobre energia nuclear e mudança climática. *ONU News*, 2019. Disponível em:< <https://news.un.org/pt/story/2019/10/1689962>>. Acesso em: 6 maio 2023.

PEREIRA, M. N. A.; DE STEFANI, Giovanni L.; SCHIRRU, Roberto. Melhorando a eficiência dos pequenos reatores modulares NuScale: uma abordagem de otimização com IA utilizando configuração seed-blanket. In: SEMANA NACIONAL DE ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA E CIÊNCIAS DAS RADIAÇÕES, 7., 2024, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: UFMG, 2024. Disponível em:< <https://www.even3.com.br/anais/vii-sencir-semana-nacional-de-engenharia-nuclear-e-da-energia-e-ciencias-das-radiacoes->

449507/967594-melhorando-a-eficiencia-dos-pequenos-reactores-modulares-nuscale--uma-abordagem-de-otimizacao-com-ia-utilizando-co>. Acesso em: 1 jun. 2025.

RIBEIRO, Daniel. Fusão nuclear. *Revista de Ciência Elementar*, v. 2, n. 4, 2014. Disponível em: <<https://rce.casadasciencias.org/art/2014/083/>>. Acesso em: 24 abr. 2025.

TAKEDA, Carolina Sayuri. Radiação de Cherenkov. 2018. Monografia (Graduação em Física) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em:<<https://www.ifsc.usp.br/~strontium/Teaching/Material20181%20SFI5708%20Eletromagnetismo/Monografia%20-%20Carolina%20-%20Cerenkov.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2025.

TAVARES, Odilon. 80 anos da fissão nuclear: a mais abundante fonte de energia disponível para a humanidade. *Ciência e Sociedade*, v. 6, n. 2, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/332644304_80_anos_da_fissao_nuclear_a_mais_a_bundante_fonte_de_energia_disponivel_para_a_humanidade>. Acesso em: 5 mai. 2023.

TEIXEIRA, Antonio et al. O futuro da energia nuclear. *Revista USP*, n. 76, p. 34-43, 2008. Disponível em:< <https://revistas.usp.br/revusp/article/view/13636>>. Acesso em: 5 mai. 2023.

TERRIN, Kátia Alessandra Pastori; BLANCHET, Luiz Alberto. Direito de energia e sustentabilidade: uma análise dos impactos negativos das usinas hidrelétricas no Brasil. *Revista Videre*, Dourados, v. 11, n. 22, p. 47–63, jul./dez. 2019. Disponível em:<<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/videre/article/view/11215>>. Acesso em: 6 mai. 2025

WILTGEN, Filipe. Energia elétrica via fusão termonuclear controlada. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT)*, v. 38, n. 3, p. 97-107, 2021. Disponível em:<<https://ebrevistas.eb.mil.br/CT/article/view/8658>>. Acesso em: 3 jul. 2025.

WILTGEN, Filipe; DA SILVA, Mateus. Sustentabilidade energética via fusão nuclear. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 2024, Pindamonhangaba. Anais...Pindamonhangaba:FATEC,2024.Disponível em:<https://www.researchgate.net/publication/385383917_ARTIGO_SUSTENTABILIDAD_E_ENERGETICA_VIA_FUSAO_NUCLEAR_PAPER_ENERGY_SUSTAINABILITY_VIA_A_NUCLEAR_FUSION>. Acesso em: 6 maio 2025.