



Universidade Federal
de São João del-Rei

ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ENERGIA NUCLEAR COMO ALTERNATIVA PARA A ENERGIA DO FUTURO

1. Matheus Rodrigues Pereira

Ouro Branco 2025

RESUMO

A energia nuclear é em grande medida malvista pela sociedade atual, muito devido à falta de informação e associação com desastres do passado, entretanto o assunto é muito mais profundo do que isso. A busca por novas energias limpas e renováveis vem ganhando cada vez mais força na sociedade e as discussões já ultrapassam a bolha acadêmica, a energia nuclear vem como uma opção viável e extremamente interessante nesse sentido. Muitos países como Japão e França já apostam na energia nuclear como principal fonte e o Brasil deveria começar a pensar em seguir esses passos caso não queira ficar para trás. Além das plantas de reatores por fissão nuclear, muito se discute sobre os avanços nessa área e a possibilidade de geração de energia por fusão, as pesquisas estão cada vez mais promissoras no assunto e a realidade de um reator capaz de converter a energia liberada em uma fusão em energia elétrica pode se tornar realidade em menos de um século. A pesquisa nuclear também é um fator imprescindível para o avanço em outras áreas como a medicina, rastreamento, segurança e a economia, a Agenda 2030, acordo feito pela ONU pode ser atendida quase que por completo caso a energia nuclear seja adotada como uma fonte real e benéfica de energia elétrica. O objetivo desse trabalho é apresentar a energia nuclear como uma fonte de energia elétrica viável, sustentável e importante para o futuro

Palavras-Chave: Energia Nuclear, Futuro, Energia Limpa.

ABSTRACT

Nuclear energy is vastly misunderstood in our society, both because it falls victim to a lot of misinformation and its association with great disasters of the past, however the theme goes way deeper than that. The search for new clean and renewable energy sources is crucial in modern days, and the discussion transcends the academic bubble; nuclear energy comes as a great and viable option in this trend. Countries like France and Japan are already willing to have nuclear energy as a main source of energy and Brazil should start to pursue it as an alternative before it gets behind everyone else. Besides the nuclear fission reactors, the talk about advances in fusion generated energy is happening with predictions of it becoming possible within a century. Nuclear research is very important in more than just the energy generation area, it also affects medicine, tracking, security and economy, 2030 Agenda proposed by UN can have almost all its requirements met by nuclear research and especially nuclear energy in case it becomes a more used source of electrical energy.

Keywords: Clean Energy, Future, Nuclear Energy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1..... 3

Figura 2..... 7

Figura 3..... 9

Figura 4..... 10

Figura 5..... 11

Figura 6..... 15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1..... 4

Tabela 2..... 17

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1..... 6

Equação 2..... 6

Equação 3..... 7

Sumário

1. Introdução	1
2. Metodologia	2
3. Revisão Bibliográfica	3
3.1 Discussão Sobre Energia Sustentável.....	3
3.2 Funcionamento e Construção de uma Usina Nuclear	3
3.3 Fissão Nuclear e Controle da Reação em Cadeia	5
3.4 Circuito Secundário e o Sistema de Arrefecimento	8
3.5 Extração e Enriquecimento de Urânio.....	12
3.6 A Energia Nuclear no Brasil.....	13
3.7 A Percepção Popular e dos Funcionários.....	15
3.8 Vantagens e Desvantagens.....	16
3.9 O Futuro da Energia Nuclear	19
4. Conclusões	20
5. Referências Bibliográficas.....	22

1. INTRODUÇÃO

A busca por novas formas sustentáveis de energia é um desafio que se torna cada vez mais presente na comunidade científica. O uso de combustíveis fósseis está se tornando cada vez mais questionável do ponto de vista da sustentabilidade e preservação do meio-ambiente, além do mais, o desenvolvimento de novas tecnologias irá exigir ainda mais da produção de energia elétrica e com a finita quantidade de combustíveis fósseis presentes no planeta uma mudança é imprescindível.

Assim como afirmou Brook (2014), independente da importância colocada na mudança climática antropológica, é inevitável a conclusão de que a forma de adquirir energia deve ser trocada. Sendo assim a pergunta que nos resta não é se devemos mudar e sim quando, uma vez que, os combustíveis fósseis são deletérios para a saúde humana e trazem consequências ambientais cada vez maiores além do mais sua extração vai se tornar cada vez mais difícil e custosa devido a sua limitação em quantia.

Silva (2007) julgou que a energia nuclear foi um caminho importante para garantir a diversificação na produção de energia, para uma maior segurança e não dependência de um só modelo. Afirmar ainda que isso foi uma preocupação com o fornecimento de petróleo que causou a busca de países como a França e o Japão de expandir seus programas nucleares.

No Brasil a energia nuclear ainda está em estágios iniciais, como disse Goldemberg (2011) em 2010 a energia produzida representou apenas 2% e a previsão era de ir para 3,4% no ano de 2019. Porém, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2025) o balanço energético nacional (BEN) não cumpriu essa previsão.

Brook (2014) dividiu o consumo de energia em nações industriais em 3 categorias, sendo elas: geração de energia elétrica, processos industriais de aquecimento e transporte. A energia nuclear já é usada de forma ampla para a produção de energia elétrica, desta forma, ela é a forma menos drástica e mais lógica de substituição dos combustíveis fósseis. É afirmado ainda que seria realista uma mudança lenta e gradual ao longo de várias décadas.

A energia nuclear por fusão é também um assunto abordado na atualidade, Wiltgen (2022) afirmou que a fusão nuclear através do confinamento magnético do plasma começa a ter positivos resultados com a construção da máquina Tokamak, também chamada de ITER.

Portanto, este trabalho tem o objetivo de fazer uma revisão bibliográfica do processo de produção da energia nuclear para estudar seus pontos positivos e negativos, em especial no Brasil, examinar a possibilidade da substituição de algumas fontes mais poluentes pela energia nuclear tanto de fissão quanto fusão e trazer essa discussão para a comunidade científica brasileira a fim de explorar essa possibilidade para um futuro mais sustentável.

A importância desse trabalho se deve, em especial, à busca por novas fontes sustentáveis de energia e reduzir os problemas causados pelo consumo de combustíveis fósil. Além disso, o avanço da área nuclear traz consigo o avanço de outras áreas, como a medicina, o tratamento de água, redução de custos e independência da matriz elétrica.

2. METODOLOGIA

Tipo de pesquisa: Revisão de literatura com abordagem qualitativa e caráter exploratório.

Objetivo: Analisar a viabilidade da energia elétrica advinda de Usinas Nucleares no contexto mundial e brasileiro.

Fontes de dados: Google Acadêmico, Livros online e outras bases confiáveis.

Período da pesquisa: agosto a novembro de 2025.

Materiais analisados: 32 artigos, publicações científicas e dados de instituições nacionais e internacionais.

Crítérios de seleção: Acesso gratuito;

Relevância direta ao tema;

Base científica sólida;

Exclusão de textos superficiais ou sem embasamento técnico.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DISCUSSÃO SOBRE ENERGIA SUSTENTÁVEL

Marino (2009) abordou o tema sobre o processo que o mundo se encontra de buscar novas formas de energia e, ao mesmo tempo, reduzir o impacto das ações humanas nas mudanças climáticas, conclui-se que a mitigação dos gases de efeito estufa é fundamental para esse processo, porém as opções dadas são caras e difíceis.

Pastura (2024) sustentou que a energia nuclear é uma proposta capaz de cumprir a “Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável” proposto e ratificada pelos 193 Estados-Membro das Nações Unidas, em setembro de 2015

Assim como afirmado por Pastura (2024), a *World Nuclear Association* (WNA) afirma que a energia nuclear contribui para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Agenda 2030, sendo alguns deles a Erradicação da pobreza através do investimento e geração de empregos gerados pelas plantas nucleares além da energia sem emissão de gases de efeito estufa ou poluição da atmosfera.

Outra ODS que é fortalecida pelo desenvolvimento de programas nucleares segundo Pastura (2024) é o de Água limpa e saneamento, uma vez que a energia nuclear tem um papel protagonista em alguns processos de dessalinização da água marinha, processo já utilizado em países como Argentina, Canadá, Paquistão e Rússia.

Mais uma ODS abordada é Energia limpa e acessível, uma vez que a demanda por energia elétrica aumenta com o passar dos anos, Pastura (2024) concluiu que a mudança para tecnologias de produção de energia limpa, como a nuclear, é essencial já que se trata de uma fonte estável, confiável, sustentável e moderna.

3.2 FUNCIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DE UMA USINA NUCLEAR

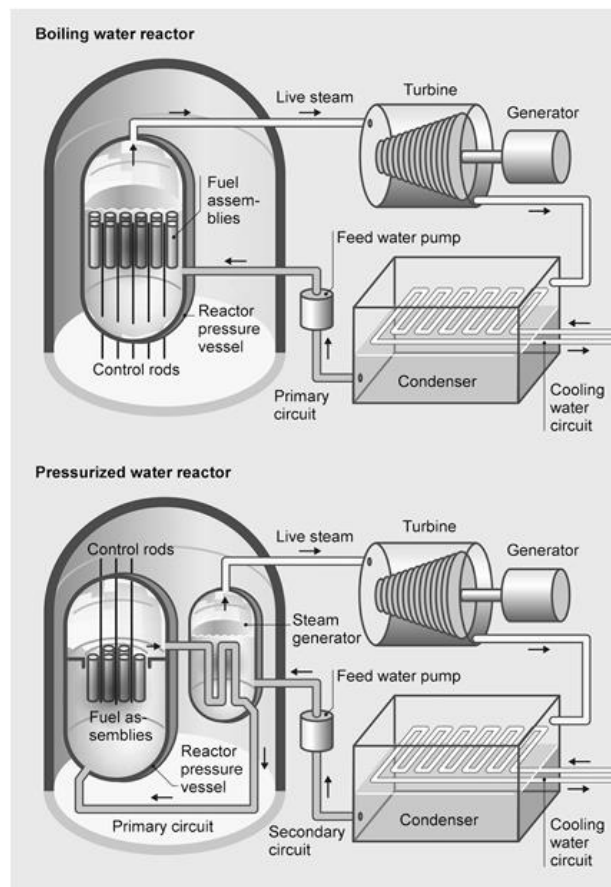
A estrutura de uma usina de geração de energia por materiais nucleares tem sua estrutura, exceto pelo reator, e funcionamento semelhantes a usinas termoeletricas convencionais, como apresentou Brain (200), sua operação segue o mesmo padrão onde o vapor gerado pela ebulição da água é pressurizado e segue para uma turbina onde será gerada a energia elétrica.

Zerger (2011) apontou uma importante discussão sobre as lições que podem ser levadas em conta em relação às construções de usinas, as circunstâncias são muito diferentes dos anos de 1970 onde a maioria das usinas em atividade hoje foram construídas. Seu estudo aborda as principais áreas foco de problemas durante a construção e manutenção devido ao uso contínuo.

Esse estudo mostrou que os itens mais afetados pela construção, manufatura ou desvio de comissionamentos são I&C (Instrumentação e controle) (19%), componentes elétricos (17%), soldas (14%), válvulas (10%) e tubulações (9%) e possibilitou levantar mais de 50 lições técnicas, que podem complementar beneficemente os documentos existentes do IAEA (IAEA, 2001, 2009) o que traz recomendações interessantes a respeito da garantia de qualidade, organização e sistemas de manejo para projetos de construção. (Zerger, 2011. p. 2925) Traduzido pelo autor.

A diferença vem na forma em que esse vapor é obtido, Brain (2000) levantou que enquanto plantas de usinas de energia mais antigas funcionam à base da queima de combustíveis fósseis em seus reatores, plantas nucleares têm seu calor gerado pela fissão nuclear. Os esquemas dos principais tipos de reatores utilizados são representados na Figura 1:

Figura 1: Esquemas de Reatores Nucleares



Fonte: Eidemüller, (2021)

Fernandes (2021) constituiu que o reator é a parte central da usina, sendo composto por: combustível nuclear, sistema refrigerante, barras de controle, materiais estruturais e o moderador nuclear, que nem sempre se faz presente na planta.

Eidemüller (2021) abordou que a classificação de reatores nucleares varia dependendo da perspectiva de quem avalia e pode parecer confusa em um primeiro momento.

Um físico pode classificar reatores como aqueles que usam nêutrons térmicos ou nêutrons rápidos, bastões de combustível ou bolas, ou combustível líquido, in natura ou urânio enriquecido ou combustível MOX, ou que tem capacidade de gerar ou não. Um engenheiro pode distinguir entre reatores com alta ou baixa temperatura de resfriamento, único ou múltiplos sistemas de arrefecimento saturado ou vapor superaquecido. A companhia de operação tem que escolher entre os tipos barato ou caro, mais ou menos seguros, mais ou menos confiáveis em termos de capacidade de carga, maior ou menor requerimento de água de resfriamento e como integrar tal usina à grade elétrica existente. (Eidemüller, 2021, p.105) Traduzido pelo autor.

Já Fernandes (2021), classificou os reatores baseado em seu combustível e seu sistema de controle ou de resfriamento. O Brasil utiliza reatores do tipo PWR em Angra I e II. A classificação dos reatores é apresentada na Tabela 1:

Tabela 1: Tipos de Reatores no Mundo

Reator	Combustível	Moderador	Refrigerante	Tecnologia
PWR	urânio enriquecido	água ou grafite	água ou grafite	EUA; Alemanha; França; Japão
BWR	urânio enriquecido	água	água	EUA; Suécia; Alemanha
GCR	urânio natural	grafite	dióxido de carbono	França; Reino Unido
AGR	urânio enriquecido	grafite	hélio	Reino Unido
HTGCR	urânio enriquecido	grafite	dióxido de carbono	Alemanha; Reino Unido; EUA
PHWR	urânio natural	água pesada	água pesada	Canadá
LMFBR	urânio natural	-	sódio líquido	Rússia; França

Fonte:Fernandes (2021)

A construção do reator nuclear deve seguir o seguinte princípio, segundo Eidemüller (2021), uma quantidade suficiente de combustível nuclear e de materiais de moderação são combinados em um arranjo geométrico cabível.

3.3 FISSÃO NUCLEAR E CONTROLE DA REAÇÃO EM CADEIA

A fissão nuclear é o processo em que um elemento sofre uma quebra em seu núcleo liberando uma grande quantidade de energia, Brain (2011) exemplificou o Urânio como um elemento que sofre esse processo de forma natural em uma taxa lenta, o que o leva a classificação como radioativo e o motivo de ser a escolha natural para a fissão induzida que ocorre nos reatores nucleares.

Bohr (1939) descreveu as reações nucleares, incluso a fissão, iniciadas por colisões ou irradiações como um processo de duas etapas, o primeiro sendo a formação de um composto extremamente excitado seguido de sua desintegração ou transição para um estado de menor energia pela emissão de radiação.

Wagemans (1991) salientou em sua obra as diferentes formas de fissão, sendo elas, segundo seus estudos, espontânea, induzidas por nêutrons, induzida por fótons e elétrons e induzida por partícula carregada. No processo de geração de energia em um reator nuclear, a fissão ocorre por indução por nêutrons.

Muito se comenta sobre o potencial destrutivo da fissão nuclear, uma vez que ela é a base das armas nucleares, Eidemüller (2021) citou esse fato e diferencia a geração de energia numa usina e numa bomba em relação a quantidade de núcleos quebrados e o controle da reação em cadeia.

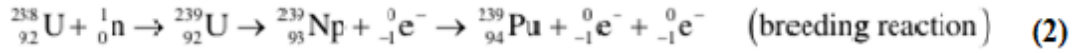
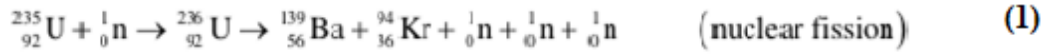
Em um reator nuclear, por outro lado, para garantir uma operação estável, o fator de multiplicação deve sempre se manter bem próximo a fim de prevenir repentinas, mudanças exponenciais em potência. Na finalidade de se aproximar de uma reação em cadeia autossustentável, a então chamada massa crítica deve estar presente. A massa crítica é definida como a quantidade de certa substância da qual uma reação nuclear autossustentável pode ocorrer. Menos material é chamado de massa subcrítica, enquanto mais é chamado de massa supercrítica. Esses valores são definidos por diferentes materiais por um arranjo ótimo esférico. Com o arranjo especial de materiais, que reflete os nêutrons de volta para o combustível nuclear, as massas críticas podem ser reduzidas, em alguns casos significativamente. (Eidemüller, 2021, p. 90). Traduzido pelo autor.

Fernandes (2021) classificou o reator por fissão e seu sistema de arrefecimento como circuitos primário, secundário e outro sistema de refrigeração, sendo assim a fissão acontece no circuito primário de uma usina.

Falando sobre o circuito primário, a reação nuclear ocorre dentro de bastões carregados por pastilhas de aproximadamente 2,5 cm (1 in), cada uma com o diâmetro aproximado de 18 mm. Brain (2011) acrescentou que se deixado a esmo, o urânio presente nessas pastilhas iria superaquecer e derreter, para evitar isso, barras de controle feito de um material que absorve nêutrons é inserido nos bastões de forma que é capaz de subir e descer. Permitindo dessa forma controlar a taxa das reações em cadeia.

As propriedades de fissão do material combustível se alteram ao longo do tempo, uma vez que, o urânio-235 é lentamente consumido essa capacidade de ocorrer a fissão diminui, conforme Eidemüller (2021), enquanto o plutônio-239 é produzido pela captura dos nêutrons do urânio-238, aumentando sua possibilidade

de dividir, logo, as duas principais reações conforme Equações 1 e 2 (Eidemüller 2021):



Eidemüller (2021) elucidou que enquanto essas barras de proteção estão estendidas no reator e absorvendo nêutrons, nenhuma reação em cadeia é possível, mesmo com a tendência natural do decaimento radioativo do urânio. Essas barras são então lentamente retiradas do reator, dando início ao processo e aumentando o que ele chama de “neutron increase factor”. Além das barras, adicionar ácido bórico, que contém um apanhador de nêutrons em sua composição, à água de resfriamento é outra forma de controle da reação em cadeia.

A energia gerada pela fissão é responsável por gerar a reação em cadeia que é o principal componente da produção de energia, uma vez que essa reação se inicie o processo de produção de energia começa. A equação que descreve a energia liberada pela fissão foi descrita por Bohr (1939) da seguinte forma, como demonstrado na Equação 3 (Bohr 1939):

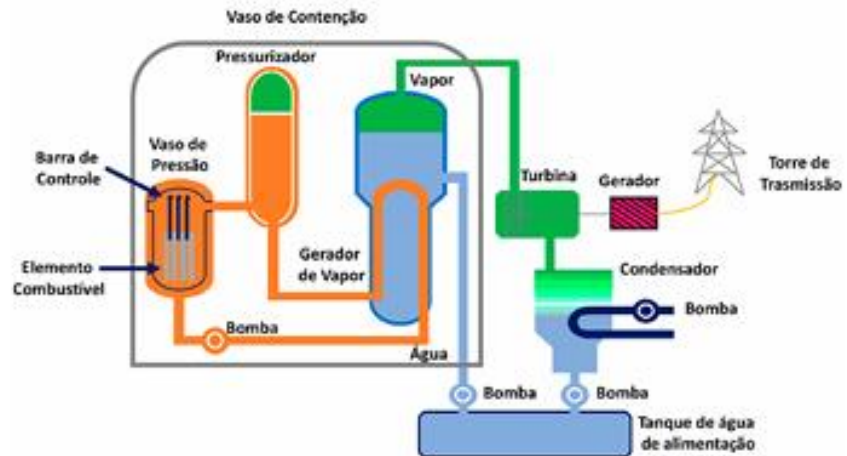
$$\Delta E = \left(M_0 - \sum M_i \right) c^2 \quad (3)$$

Onde M_0 e M_i representam as massas original e do produto da divisão em descanso, sem excitação.

Ainda dentro desse circuito, após essa grande liberação de energia a água no reator é evaporada e vai em direção a um pressurizador em sistema fechado, como apontado por Fernandes (2021). Essa água é altamente radioativa e sofre uma mudança na sua massa específica e pressão, controlada pelo pressurizador nas usinas de PWR, durante sua operação o pressurizador é preenchido por 2 fases, líquido e vapor e é feito um controle para que a operação ocorra sem se interromper, caso alterações no sistema elétrico ou na turbina a vapor aconteçam ela leva a alterar o controle da pressão. Essa água radioativa é a responsável por aquecer a água do circuito secundário em uma transferência de calor entre os circuitos, após essa troca

a água radioativa menos quente continua seu ciclo ao passar por uma bomba a qual resfria o reator. A Figura 2 mostra os sistemas primário (laranja), secundário (verde) e de resfriamento (azul) de uma usina que utiliza um reator do tipo PWR:

Figura 2: Esquema de uma Usina Nuclear



Fonte: Fernandes (2021)

3.4 CIRCUITO SECUNDÁRIO E O SISTEMA DE ARREFECIMENTO

A escolha do local para implementação de uma usina nuclear é de suma importância, tendo em vista que é necessária uma imensa quantidade de água para que o processo ocorra. Eidemüller (2021) explicou que, uma vez que usinas nucleares são extremamente lucrativas quando operam em altas taxas de produção por longos períodos e que apenas um terço de sua produção de calor seja convertida em eletricidade, o calor restante deve ser dissipado para o ambiente sendo a dissipação por ar insuficiente o que leva a uma altíssima demanda por água de resfriamento.

Outro fator importante é a realocação dessa água de volta à sua origem, em casos de rios e lagos, como abordado por Eidemüller (2021), um pequeno aumento na temperatura pode causar consequências ecológicas gravíssimas e, portanto, deve haver na usina um reservatório para que a água atinja a temperatura desse corpo d'água antes de retornar.

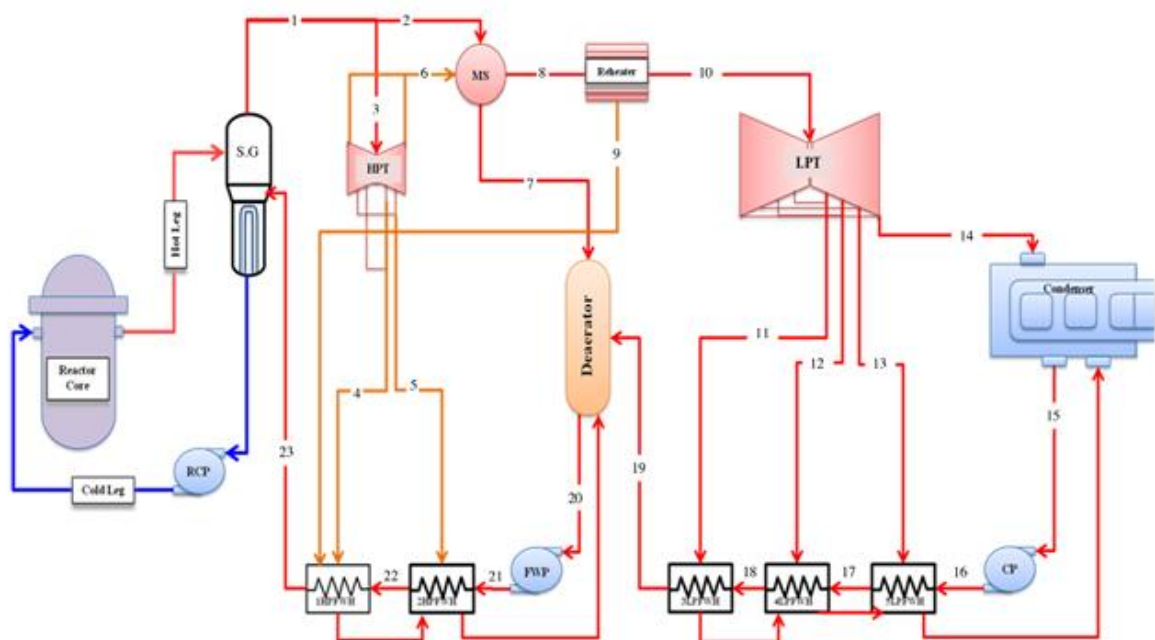
Além do impacto ambiental, deve-se ter em mente o impacto que a temperatura da água utilizada terá na eficiência da planta nuclear, Attia (2015) realizou um estudo sobre o impacto dessa temperatura na transformação do calor e

vapor gerado em energia elétrica, metodologia utilizada é baseada num programa computacional que segue a seguinte performance em ordem:

Propriedades termodinâmicas: pressão (P), temperatura (T), entropia (S), entalpia (h), teor de humidade (X) em todas as entradas e saídas de todos os componentes da planta. Equilíbrio térmico para cada aquecedor de água de alimentação e gerador de vapor. Saída de trabalho útil das turbinas e bombas. Cálculo da quantidade de calor adicionada para gerar vapor, assim como a quantidade de calor rejeitada pelo condensador e calcular a eficiência da estação. Já que o diagrama da temperatura entrópica (T-s) da planta e seus componentes, assim como as numerações dos resultados são relatados. Determinação dos resultados é reportado. Determinação das temperaturas da entrada da água de resfriamento (T_{in}) e da temperatura de saída (T_{out}) e a diferença de temperatura. Propor um limite da variação de mudança de temperatura da água de resfriamento (T_{cwi}) durante todo o ano para o mar mediterrâneo como (15-30 °C). Computar o impacto das mudanças da temperatura da água de resfriamento (T_{cwi}) na eficiência térmica (η_{th}) no trabalho e saída (W_{net}) da planta. Desenhar a relação T_{cwi} vs. η_{th} e W_{net} da planta. (Attia, 2015, p. 373) Traduzido pelo autor.

Baseado nesses estudos, Attia (2015) chegou à conclusão que o aumento de apenas 1°C na água que o condensador extrai do ambiente pode acarretar num decréscimo de produção de energia e de eficácia térmica de 0,444% e 0,152% respectivamente, a Figura 3 demonstra o diagrama de análise utilizado por Attia.

Figura 1: Diagrama do balanço de calor de uma NPP utilizado na metodologia de Attia



Fonte: Attia (2015)

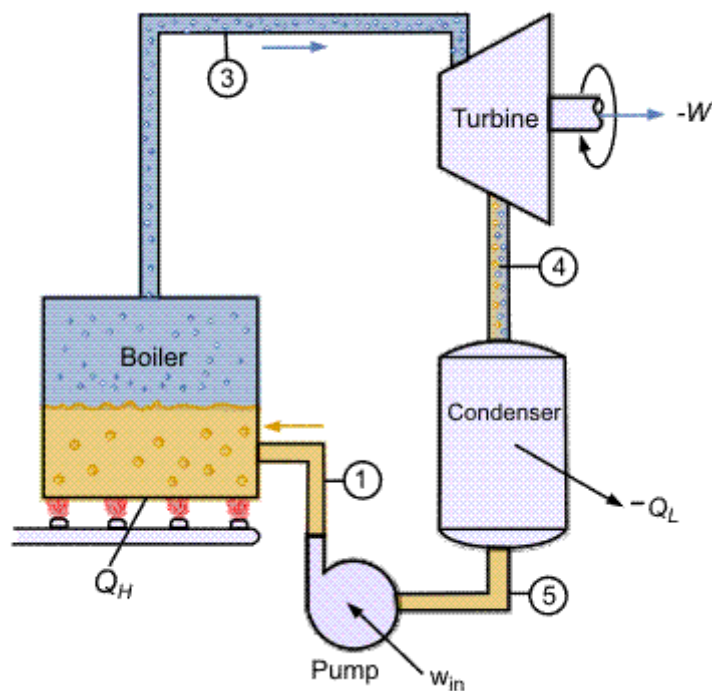
Outro tipo de dissipador de calor foi proposto por Jeong (2015), que após a tragédia ocorrida em Fukushima em 2011 repensou o sistema de resfriamento de usinas nucleares e abordou o tema de uma tubulação híbrida para resfriar o reator

em um sistema de refrigeração passivo prevenindo superaquecimentos, segundo seu estudo essa tubulação híbrida se mostra distinta no sentido de ser a única solução para resfriar o reator durante o processo de despressurização é impossível e a injeção de água se torna inviável.

É no circuito secundário que ocorre a geração do vapor que será direcionado às turbinas gerando energia elétrica, esses geradores são grandes trocadores de calor verticais, como observou Fernandes (2021), os geradores de vapor utilizam normalmente tubos de níquel para sua transferência de temperatura e possuem um separador de água e vapor no topo de sua composição. O fluido proveniente do circuito primário é o responsável por aquecer a água nesse gerador que é alimentado pela fonte de água escolhida, normalmente rios ou lagos.

Conforme o processo acontece, a separação das fases no gerador acontece, direcionando o vapor para as turbinas e o líquido retorna como alimentação tornando o processo contínuo. Essa turbina a vapor é o equipamento no qual o vapor de água e sua energia térmica é transformada em trabalho mecânico, Fernandes (2021) demonstrou que o ciclo que descreve essas turbinas é algo muito similar ao ciclo térmico de Rankine, a Figura 4 demonstra o ciclo de Rankine:

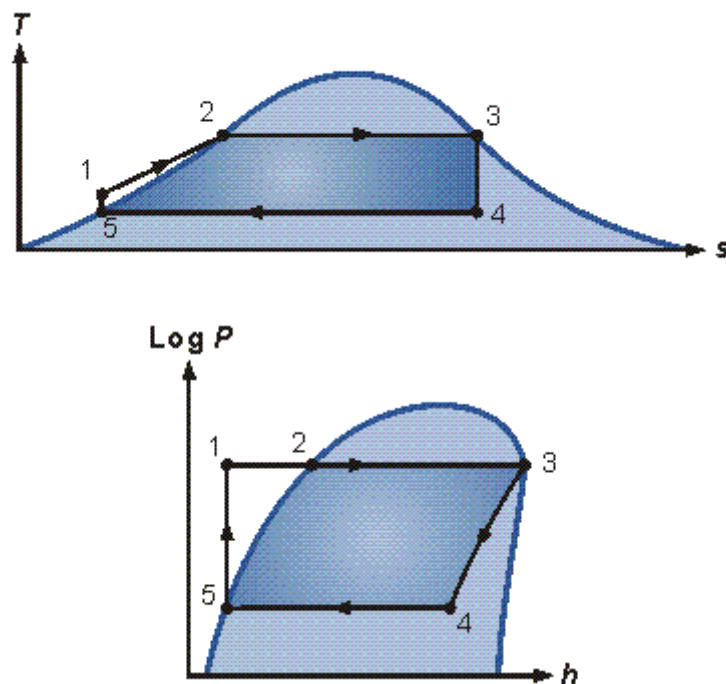
Figura 2: Ciclo de Rankine



Fonte: Muller-Steinhagen (2011)

Muller-Steinhagen (2011) descreveu o ciclo da seguinte forma, utilizando a imagem acima como referência e considerando o sistema ideal, o primeiro processo é a transferência de calor isobárica, o líquido já pressurizado entra através de uma bomba (1) e é aquecido até sua temperatura de saturação no aquecedor ou boiler (2), a adição contínua de energia faz com que a evaporação do líquido continue até ser completamente convertido em vapor saturado. Esse desenvolvimento é seguido de uma expansão isentrópica que acontece na turbina que gera trabalho que poderá ser convertido em eletricidade, essa expansão é limitada pela temperatura de resfriamento e pela erosão das pás da turbina uma vez que a execução entra num estado de duas fases, líquida e gasosa. Após isso, ocorre uma rejeição de calor isobárica, a mistura bifásica que sai da turbina em (4) chega ao condensador que opera a baixas pressões, menor que a pressão atmosférica, normalmente com água de resfriamento até a saturação do fluido. Finalmente, a água sai do condensador (5) e alimenta a bomba onde o processo se repete, por conta do volume específico baixo dos líquidos, o trabalho dessa bomba é pequeno e muitas vezes ignorado em cálculos termodinâmicos, a Figura 5 apresenta os gráficos para a análise desse ciclo:

Figura 3: Gráficos Txs e P_{xh} do Ciclo de Rankine Ideal



Fonte: Muller Steinhagen (2011)

O trabalho mecânico gerado nessa turbina será responsável pela geração de energia elétrica em um sistema turbina-gerador, Fernandes (2021) elucidou também que esse é o mesmo sistema usado em usinas térmicas convencionas como as que utilizam carvão ou gás para aquecer, porém as usinas nucleares têm o diferencial de se usar mais vapor uma vez que o vapor gerado em usinas nucleares é de baixa pressão.

3.5 EXTRAÇÃO E ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO

O urânio, apesar de ser encontrado in natura, é apresentado em 3 isótopos diferentes sendo eles U-234, U-235 e U-238. Makhijani (2004) demonstrou a diferença entre os três tipos: o primeiro, U-234, é um elemento extremamente radioativo encontrado em urânio natural, porém não é utilizável para nenhuma função. O segundo, U-235, é o único capaz de sofrer o processo de fissão e ocorre em quantias significantes na natureza. Já o terceiro, U-238, é responsável pela maior presença no minério, sendo aproximadamente 99,284% do peso.

O elemento de número 92 na tabela periódica, se destaca como uma fonte muito importante da matriz energética mundial e de suma relevância para a operação de uma usina nuclear, sendo a fissão dele a responsável pelo aquecimento do reator. Dito isto, no Brasil, os primeiros estudos a respeito desse elemento foram realizados no final do século passado, como apontou Lima (2021), sendo a primeira descoberta na década de 40 relacionada ao minério de caldazito. Segundo o INB, as jazidas brasileiras estão localizadas principalmente nos estados da Bahia, Ceará, Minas Gerais e Paraná, tendo uma estimativa de 244788 toneladas de urânio contido (U_3O_8) e a principal jazida em Caetité, na Bahia, contendo cerca de 100000 toneladas, tornando o Brasil um país de destaque nesse assunto.

Apesar desse grande destaque em urânio bruto, o Brasil é ainda limitado em relação ao seu enriquecimento do minério, Silva (2018) indicou que apenas 25% do urânio utilizado em Angra I é enriquecido no Brasil, sendo os outros 75% importados, gerando enormes custos de operação. Em seu trabalho Silva levanta a importância da discussão sobre a necessidade de expandir a produção nacional dessa matéria prima tendo em vista que a diversificação de matrizes energéticas é essencial devido ao aumento gradual da população, tecnologia e consequentemente a demanda energética.

A extração do urânio assim como de qualquer minério traz consigo impactos ao ambiente, sejam eles de curto ou longo prazo. Junior (2021) realizou uma análise das alterações no ambiente que a exploração desse mineral acarretou o Brasil, sendo listados 63 eventos, dos quais 86% são classificados como negativos, esse estudo aponta também a extração como a principal ação poluidora.

Como o principal isótopo utilizado nas usinas são encontrados em baixíssimas quantidades no mineral, as usinas term nucleares padrões, que utilizam água como líquido refrigerante, precisam que esse produto passe por um processo conhecido genericamente como “enriquecimento de urânio”, como explicou Makhijani (2004). O termo “enriquecimento” arremete ao aumento da porcentagem do isótopo fusível, sendo os reatores típicos utilizando a matéria prima enriquecida até 3-5% enquanto o resto é composto majoritariamente de U-238, sendo essas porcentagens muito baixas para a produção de bombas.

O processo de enriquecimento era largamente feito através da difusão gasosa, porém essa técnica é extremamente custosa em questão energética. Olander (1981) foi um dos pioneiros ao propor o processo de centrifugação a gás que utiliza apenas 5% da energia em relação ao outro método. Atualmente essa se tornou a principal forma de obter o produto enriquecido.

O processo teorizado e experimentado por Olander (1981) segue a seguinte ordem, primeiro se converte o urânio quimicamente em hexafluoreto de Urânio UF_6 que possui uma temperatura de ebulição relativamente baixa, cerca de 56°C. Em seguida se coloca esse gás em uma centrífuga e gira em velocidades de altas grandezas, aproximadamente dezenas de milhares de rotações por minuto. Como resultado, o urânio U-238 mais pesado se separa do U-235 mais leve se dispondo em partes distintas dos cilindros da centrífuga e sendo retiradas em seguida. Uma vez que esse processo garante apenas um pequeno enriquecimento ele é realizado em cascatas onde uma etapa alimenta a próxima até atingir o enriquecimento desejado.

3.6 A ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL

O Brasil possui 2 usinas nucleares em seu território, sendo elas Angra I e Angra II. Segundo dados da EPE (2025), essa fonte foi responsável por apenas 2,1% da matriz elétrica brasileira no ano de 2024, dados preocupantes se levarmos em

consideração as expectativas do começo do século. Goldemberg (2011) comentou que o Plano Nacional de Energia previa um aumento para 3,4% no ano de 2019 e posteriormente de 7,4% em 2030 com a construção de Angra III em 2015 e a construção de outros 4 reatores, o que nunca aconteceu.

Desenvolver alternativas de produção de energia elétrica é essencial para o progresso de um país e para manter sua soberania, no Brasil a principal fonte energética é advinda de usinas hidroelétricas que, como expõe Goldemberg (2011), sofreu variações sazonais devido a períodos de seca ou de chuva abundante o que acarreta crises energéticas em todo país.

A exemplo de outros países, como Japão e França, o Brasil deve se inspirar em desenvolver seu programa nuclear, na visão de Silva (2007), por ser uma fonte de energia que não emite gases do efeito estufa. Seu papel se prova cada vez mais importante nas discussões mundiais, gerando debates em todo o globo a seu respeito, reatores cada vez mais avançados e seguros vêm sendo desenvolvidos o que, caso o Brasil não discuta o assunto, pode tornar nossa matriz energética atrasada.

Falando de exemplos internacionais, a França decidiu investir no programa nuclear e hoje tem, como informou EIA (U.S. Energy Information Administration) (2025), sua principal fonte como a energia nuclear, atingindo redução em seus custos energéticos e inclusive servindo como exportador de energia para países vizinhos.

Outro ponto importante de se destacar é, como disse Fernandes (2021), o aspecto do aumento da demanda por energia devido ao aumento da população e da disposição de espaço para a produção de energia, comparativamente a energia nuclear ocupa um espaço pequeno para a sua capacidade. O avanço da engenharia e das pesquisas nesse setor também ajudam a diminuir os riscos e tornar essa uma opção cada vez mais vantajosa.

Como analisado em dados fornecidos pela EIA (2025), a série histórica brasileira retrata algo preocupante em relação à energia nuclear, a quantidade de eletricidade produzida está estagnada em cerca de 14 bilhões de kWh desde o ano de 2001, o que vai de oposto a grandes potências internacionais.

Um aspecto crucial na análise dos benefícios de explorar a alternativa nuclear no Brasil é a grande quantidade de matéria-prima existente no território nacional, como propôs Lima (2021), apenas o urânio encontrado em Caetité seria o bastante para abastecer Angra I, II e III por 100 anos, Lima também vê com bons olhos o início da reutilização da Usina de Santa Quitéria no Ceará.

Criar independência da importação é algo essencial para estabelecer a soberania do país, porém para atingir esse objetivo é necessário investimento também no processo de enriquecimento do urânio, como indicou Silva (2018) o país não possui uma lavra com extração ativa muito por conta da dificuldade de se obter todas as licenças necessárias, o que leva o país a importar 75% do combustível usado em Angra I. É inviável estabelecer um plano e planejamento de investimento nessa tecnologia sem o apoio do governo seja por isenções fiscais ou por remanejamento dos protocolos necessários para a exploração e enriquecimento do urânio tornando o país autossuficiente, competitivo e possivelmente entrar no mercado como exportador.

Além disso, como apontado por Fernandes (2021), o país vem enfrentando momentos de chuvas irregulares o que é um enorme estorvo para a maior fonte de energia elétrica do país, a hidroelétrica. Isso será algo comum no futuro devido a mudanças climáticas, o crescimento da energia hidroelétrica é limitado o que realça a importância de remanejar e substituir a matriz elétrica do Brasil.

3.7 A PERCEPÇÃO POPULAR E DOS FUNCIONÁRIOS

Um dos principais problemas que o assunto da energia gerada por usinas nucleares enfrenta é a desinformação a seu respeito, Greenberg (2011) realizou uma pesquisa nos EUA sobre as percepções da população a respeito da matriz energética. Quando comparadas as usinas com base em carvão e reatores nucleares, cerca de 30% dos participantes foram favoráveis ao aumento na dependência de energia nuclear mesmo reconhecendo riscos envolvidos enquanto apenas 10% favoreceram usinas térmicas baseadas em carvão, reconhecendo sua influência no aquecimento global.

Um fator importante de destacar na pesquisa de Greenberg (2011) foi a diferença socioeconômica dos participantes e suas respostas, participantes mais

instruídos, com formação acadêmica tendem a preferir a energia nuclear, uma prova de como a desinformação afeta a percepção do público a respeito do tema.

De forma parecida, Sjöberg (1991) realizou uma pesquisa a respeito da percepção dos trabalhadores de usinas sobre os riscos envolvidos. Em suma, Sjöberg chegou a uma conclusão parecida com Greenberg, em que o nível de instrução da pessoa estava correlacionado a sua percepção do risco envolvido no processo, apontando inclusive a desinformação como a principal possibilidade para a relação entre risco percebido e conhecimento de risco ser negativa.

3.8 VANTAGENS E DESVANTAGENS

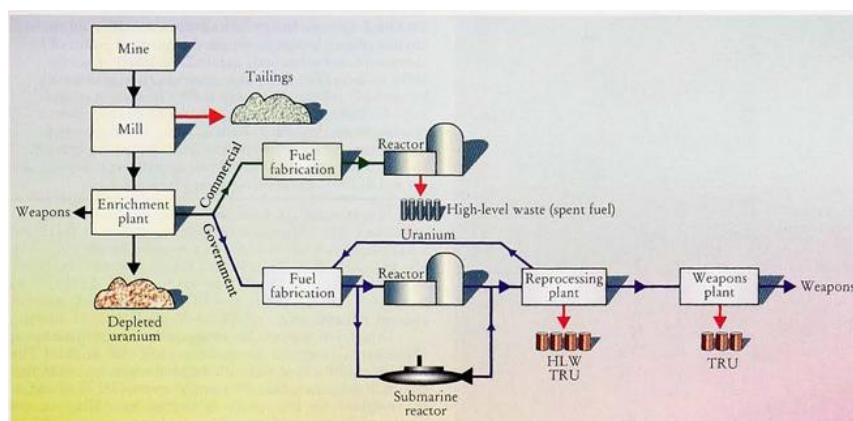
Não apenas de pontos positivos é feita a escolha de se investir em energia nuclear, apesar dos enormes benefícios existe também os fatores preocupantes, sendo eles principalmente: os resíduos gerados, o impacto ambiental desde a extração do urânio até a implementação da usina e o perigo do avanço no projeto em direção a armas nucleares.

A respeito dos resíduos, Ahearne (1997), os detalhou e classificou como:

As categorias de resíduos segundo os EUA são alto-nível, transurânico e baixo-nível. Resíduos de moinho podem ser adicionados como uma quarta categoria a Figura 1 mostra que resíduos de alto-nível, incluindo o combustível nuclear usado, é gerado por reatores nucleares e plantas de reprocessamento. Resíduo de baixo-nível, ou resíduo contaminado por comparativamente baixa quantidade de materiais radioativos, são gerados em maior parte pelo processo mostrado na figura 1, assim como em atividades médicas e industriais. O resíduo transutânico vem de plantas de reprocessamento e plantas de armas nucleares (Ahearne, 1997, p. 24). Traduzido pelo autor.

A Figura 6 a seguir demonstra as principais formas de geração desses rejeitos em um fluxograma da geração de resíduo e energia de usinas nucleares:

Figura 6: Processo de Geração de Resíduo Nuclear



Fonte: Ahearne, 1997

Ramana (2018), também levantou dados sobre os problemas associados, ele aborda como as soluções dadas ao problema enfrentam enorme oposição do público devido ao medo e preocupação com a radioatividade. A solução mais utilizada é a de armazenamento em locais apropriados e nesse estudo ele aponta a Finlândia, Suécia e França como exemplos de países que lidam com esse problema a mais de meio século e serão os primeiros a implementar armazéns geológicos profundos, porém mesmo com essa aparente solução, a oposição de protestantes é um fator relevante nesses países.

RAO (2001) também citou como as soluções atuais não são o suficiente para os planos a longo prazo, porém ele enxerga com certo otimismo ao dizer que todas as opções ainda não foram sondadas e estudos a respeito do tema ganham atenção dos especialistas.

Outro problema associado é também a fabricação e utilização de armas nucleares, tendo em vista como o mundo está se direcionando a conflitos cada vez maiores nos últimos anos, essa ideia ganhou força, a falta de clareza no processo contribui para isso. Assim como expôs Ford (1975) existe uma abundância de evidências que as informações dadas pela AEC (Atomic Energy Commission) foram de alguma forma manipuladas, mal representadas e muitas vezes suprimindo possíveis problemas para dar uma percepção melhor ao público.

Um fator relevante a se considerar é também a necessidade de uma fonte de água grande para o processo de resfriamento do reator, como explicou Eidemüller (2021), sendo mais um dos processos necessários na construção das usinas, que vem se tornando cada vez mais lentos e precisos devido a medidas de segurança, além da complexidade que é o desmantelamento da usina caso ela venha a ser desligada.

Como parte dos pontos positivos de sua implementação a energia nuclear tem como principal apreço ser uma fonte de energia limpa, uma vez que não emite gases do efeito estufa, ocuparem relativamente pouco espaço quando comparado a usinas hidroelétricas por exemplo, o avanço do programa nuclear traz benefícios não só na área de eletricidade como também na medicina, economia e geografia e ser uma alternativa de fonte energética que tem baixíssima variação em eficiência.

Brook (2014) listou diversos benefícios da escolha nuclear, como: viabilidade econômica a exemplo da França que possui um dos menores custos de eletricidade e é subsidiada em 75% por essa energia, longevidade da matéria prima e em grande quantidade, não emissão de gases a base de carbono, sendo responsável por prevenir cerca e 2 bilhões de toneladas de CO₂ todos os anos e segurança e estabilidade.

A despeito da segurança, muito se comenta sobre os três principais acidentes que envolveram esse tipo de planta, Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima que são sem dúvidas acidentes com consequências catastróficas, porém, como descrito por Pastura (2024), as informações acabam sendo alarmistas tornando o debate muito técnico o que dificulta o entendimento do público leigo.

Brooke (2014) também teceu comentários a respeito da segurança fazendo comparações com outros tipos de usinas, usando o caso mais severo em questão do número de mortes, Chernobyl, ainda é um número consideravelmente pequeno quando se usa os dados da World Health Organization (WHO) para mortalidade a cada bilhão de kWh por qualquer tipo de causa, a Tabela 2 organiza e apresenta esses dados:

Tabela 2: Mortalidade de Usinas Elétricas por bilhão de kWh Produzido

TIPO DE USINA	MORTES POR BILHÃO DE kWh PRODUZIDO (QUALQUER CAUSA)
Carvão	100
Óleo	36
Biocombustível/Biomassa	24
Gás Natural	4
Hidroelétrica	1,4
Solar	0,44
Eólica	0,15
Nuclear	0,04

Fonte: Brooke (2014)

Além da energia limpa, a pesquisa nuclear apresenta outras vantagens, como disse Pastura (2024) sobre a medicina nuclear que é utilizada no mundo todo em procedimentos como radioterapia e radiodiagnósticos, ela aborda também como a percepção do público nesse caso enxerga apenas como um procedimento médico e não como energia nuclear o que reforça a ideia da dificuldade de comunicação.

Outras contribuições importantes são as listadas por Pastura (2024): combate à pragas, evitando a necessidade de recorrer a pesticidas nocivos, incentivo à educação especializada para desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e mão de obra qualificada, o acesso a água limpa potável através da dessalinização da água do mar utilizando o calor gerado pelos reatores, processo já utilizado no Canadá, Rússia, Paquistão e Argentina, estabilidade e sustentabilidade.

3.9 O FUTURO DA ENERGIA NUCLEAR

Sem dúvidas o futuro da energia nuclear é a energia através da fusão, ao contrário da fissão, a fusão nuclear é quando ocorre a união de 2 núcleos formando um novo elemento com um maior número de prótons e com isso liberando uma grande quantidade de energia.

Federici (2001) já comentava sobre essa possibilidade afirmando que já naquela época a fusão foi possível em 2 tipos de aparelhos de grande escala, o TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) com a produção de 10.7 MW e o JET (Joint European Torus) produzindo 16MW, sendo o primeiro localizado em Princeton e sendo a primeira máquina a usar uma mistura 50-50 de DT (deutério e trítio, isótopos do átomo de hidrogênio) que é a matéria prima dessa operação. Já o segundo, localizado em Oxfordshire na Inglaterra e gerido em conjunto pela Comunidade Europeia, foi o primeiro aparelho a atingir mais de 1 W produzido por fusão em 1991, também sendo o que chega mais próximo de $Q = 1$ para operações com DT.

JET TEAM (1992) realizou experimentos em seu reator Tokamak JET e relatou os seguintes resultados: Descargas de $Q_{DD} > 2 \times 10^{-3}$ e $Q_{DT} > 0,5$ são obtidos de forma rotineira e confiável e o melhor resultado foi de $Q_{DD} > 5 \times 10^{-3}$ e $Q_{DT} > 1,14$, demonstrando que a força total de fusão excedeu as perdas nas descargas de DT nas condições transientes. Uma demonstração de que mesmo no século passado os

resultados já eram promissores o que torna um novo marco científico nesse aspecto pode estar se aproximando.

A construção dos equipamentos necessários para experimentos de fusão nuclear é de grande escala visando atingir resultados melhores, porém, um estudo realizado por Costley (2015) observou que o tamanho pode atingir um limite antes do esperado, em seu estudo ele afirma que foi aceito de forma generalista que a rota para a fusão envolveria grandes maquinários de escala ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), de proporções 24x30m, ou maior contudo seu experimento demonstra que ao contrário do esperado, para tokamaks em estado estacionário e operando com frações de densidade fixas e limite de emissões tipo β a fusão ganha Q dependendo principalmente do nível absoluto de poder de fusão e energia de confinamento e minoritariamente no tamanho da máquina.

A discussão sobre esse avanço também levanta dúvidas a respeito de “por que estudar esse tema se a fissão nuclear já é utilizada?”, essa é uma das dúvidas que Mishra (2020) respondeu em seu trabalho de revisão sobre a fusão nuclear, sendo os pontos levantados por ele:

1. Sabemos que a fusão gera muito mais energia do que a fissão mesmo utilizando a mesma quantidade de combustível;
2. A fusão nuclear não gera reações em cadeia como a fissão;
3. Os resíduos gerados pela fissão são um problema a se enfrentar, porém os resíduos da fusão são partículas α capturadas para outros propósitos;
4. Na fissão nuclear pode causar a explosão do reator a partir de qualquer tipo de contaminação já a fusão, por exigir condições extremamente específicas para ocorrer, qualquer tipo de distúrbio gera a paralisação da reação
5. Finalmente, a matéria prima da fissão U^{235} não é um material disponível em qualquer lugar e tende a se tornar cada vez mais raro, já o combustível da fusão, D e T podem ser gerados em laboratório.

4. CONCLUSÕES

Conforme é possível observar depois dessa análise minuciosa de diversas fontes e autores, a energia nuclear é um assunto que deve ser reavaliado como opção para a matriz elétrica brasileira uma vez que a sua discussão já está acontecendo ao

redor do mundo e alguns países como França, Japão e Alemanha já tem esse tipo de energia como sua principal fonte.

A de se ressaltar que não só a energia por fissão, mas também por fusão é alvo de estudos, experimentos e discussão na academia internacional e que a energia via fusão nuclear é uma grande promessa para o futuro.

Não só a produção de eletricidade é afetada pelo programa nuclear, outras áreas também serão atingidas o que realça sua importância, como a área da medicina, segurança, rastreamento e monitoração e até o tratamento de água através da dessalinização.

É inegável que quando falamos de energia nuclear uma imagem negativa é a mais associada com o assunto como os desastres de Chernobyl e Fukushima, o problema que os rejeitos deixados pela produção e mineração do urânio enriquecido e o constante medo de armas nucleares são as primeiras imagens que pessoas comuns tem.

Porém, após a revisão feita nesse trabalho é possível concluir que os pontos positivos como ser uma fonte de energia limpa, gerar mais independência no setor elétrico sendo mais uma forma viável de produção de eletricidade, fomentar a economia seja por contas de energia mais baratas, seja na geração de empregos e de mão de obra especializada ou até nos estudos e experimentos produzidos na área, sobressaem aos negativos e a discussão de novas plantas nucleares no Brasil deve ser feita o quanto antes.

Para realizar isso, é necessário que a sociedade acadêmica dê um passo na direção correta e divulgue, relate e pesquise sobre formas de reanimar o projeto nuclear brasileiro, seja através de estudos econômicos e viabilidade financeira ou estudos de casos de locais viáveis para novas usinas.

Uma vez que esse passo seja alcançado, caberá ao governo estabelecer metas de investimento para que isso ocorra, seja através de isenções fiscais, investimentos via BNDES ou até parcerias público privadas, no intuito de criar novas usinas, alavancar o setor nuclear no Brasil e trazer independência e diversidade para a matriz elétrica do país.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHEARNE, John F. *Radioactive waste: the size of the problem*. **Physics Today**, v. 50, n. 6, p. 24–29, 1997.

ATTIA, Sami I. *The influence of condenser cooling water temperature on the thermal efficiency of a nuclear power plant*. **Annals of Nuclear Energy**, v. 80, p. 371–378, 2015.

BOHR, Niels; WHEELER, John Archibald. *The mechanism of nuclear fission*. **Physical Review**, v. 56, n. 5, p. 426–450, 1939.

BRAIN, Marshall; LAMB, Robert. *How nuclear power works*. **HowStuffWorks**, 2000. Disponível em: <https://www.howstuffworks.com/nuclear-power.htm>. Acesso em: 14 out. 2025.

BROOK, Barry W. *et al. Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix*. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 1–2, p. 8–16, 2014.

COSTLEY, A. E.; HUGILL, J.; BUXTON, P. F. *On the power and size of tokamak fusion pilot plants and reactors*. **Nuclear Fusion**, v. 55, n. 3, p. 033001, 2015.

DA SILVA, Samara; MIOTTO, Ronisson Paulo; CLEMENTE, Igor Magalhães. *Urânio no Brasil: uma análise sobre sua viabilidade energética no contexto atual*. In: **SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO (SIEPE)**, 10., 2018, Santana do Livramento. **Anais [...]**. Santana do Livramento: UNIPAMPA, 2018.

DOS SANTOS JUNIOR, Elias Lira *et al. Avaliação de impacto ambiental aplicada à extração de urânio no Brasil*. In: **CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE**, 4., 2001, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: [s.n.], 2001.

EIDEMÜLLER, Dirk. *Nuclear power explained*. Cham: Springer, 2021. E-book.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanço Energético Nacional 2025: ano base 2024*. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 14 dez. 2025.

FEDERICI, Gianfranco *et al.* *Plasma-material interactions in current tokamaks and their implications for next step fusion reactors*. **Nuclear Fusion**, v. 41, n. 12, p. 1967–2137, 2001.

FERNANDES, Daniella Rodrigues *et al.* *Energia nuclear: importância, conceitos químicos e estrutura das usinas nucleares*. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 3, p. 635–649, 2021.

FORD, Daniel F.; KENDALL, Henry W. *Nuclear misinformation*. **Environment**, v. 17, n. 5, p. 17–27, 1975.

GREENBERG, Michael; TRUELOVE, Heather Barnes. *Energy choices and risk beliefs: is it just global warming and fear of a nuclear power plant accident?* **Risk Analysis**, v. 31, n. 5, p. 819–831, 2011.

GOLDEMBERG, José. *O futuro da energia nuclear*. **Revista USP**, São Paulo, n. 91, p. 6–15, set./nov. 2011.

JET TEAM *et al.* *Fusion energy production from a deuterium-tritium plasma in the JET tokamak*. **Nuclear Fusion**, v. 32, n. 2, p. 187–203, 1992.

JEONG, Yeong Shin *et al.* *Hybrid heat pipe based passive in-core cooling system for advanced nuclear power plant*. **Applied Thermal Engineering**, v. 90, p. 609–618, 2015.

LIMA, Fernanda Silva; DA SILVA FILHO, Wilson Seraine. *Potencial uranífero no Brasil: uma revisão bibliográfica*. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 58852–58867, 2021.

MAKHIJANI, Arjun; CHALMERS, Lois; SMITH, Brice. *Uranium enrichment*. Takoma Park: Institute for Energy and Environmental Research, 2004. Disponível em: <https://ieer.org/resource/reports/uranium-enrichment/>. Acesso em: 14 dez. 2025.

MARINO, Matheus K. *Era da energia limpa*. **Agroanalysis**, v. 29, n. 12, p. 41–42, dez. 2009.

MISHRA, Avinash Kumar; ANITHA, G. *Nuclear fusion reactor: a review study*. **Nuclear Fusion**, v. 4, n. 3, 2020.

MULLER-STREINHAGEN, Hans Michael Gottfried. *Rankine cycle*. **Thermopedia**, 2011. Disponível em: <https://www.thermopedia.com/content/1072/>. Acesso em: 15 nov. 2025.

OLANDER, Donald R. *The theory of uranium enrichment by the gas centrifuge*. **Progress in Nuclear Energy**, v. 8, n. 1, p. 1–33, 1981.

PASTURA, Valéria da Fonseca e Silva *et al.* *Perspectivas dialógicas sobre a energia nuclear: (des)informação com vista à Agenda 2030*. In: **CONEDU**, 10., 2024, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: Realize Editora, 2024. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/109301>. Acesso em: 11 set. 2025.

RAMANA, Muvva V. *Technical and social problems of nuclear waste*. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, v. 7, n. 4, e289, 2018.

RAO, K. R. *Radioactive waste: the problem and its management*. **Current Science**, v. 81, n. 12, p. 1534–1546, 2001.

SILVA, Antônio T. e. *O futuro da energia nuclear*. **Revista USP**, São Paulo, n. 76, p. 34–43, dez. 2007/fev. 2008.

SJÖBERG, Lennart; DROTTZ-SJÖBERG, Britt-Marie. *Knowledge and risk perception among nuclear power plant employees*. **Risk Analysis**, v. 11, n. 4, p. 607–618, 1991.

UNITED STATES. **Energy Information Administration**. *International electricity data*. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.eia.gov/international/data/world/electricity>. Acesso em: 15 dez. 2025.

WAGEMANS, Cyriel. *The nuclear fission process*. Boca Raton: CRC Press, 1991.

WILTGEN, Filipe. *Eletricidade via fusão nuclear*. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 14, n. 3, p. 235–247, maio 2022.

ZERGER, Benoît; NOËL, Marc. *Nuclear power plant construction: what can be learned from past and on-going projects?* **Nuclear Engineering and Design**, v. 241, n. 8, p. 2916–2926, 2011.



Documento assinado digitalmente

MATHEUS RODRIGUES PEREIRA

Data: 15/12/2025 22:27:05-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>