



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Análise das diferenças, dos avanços e das limitações dos reatores de fissão e fusão nuclear no contexto das energias limpas: Uma Revisão de Literatura

Jaqueline Fonseca Rodrigues

Engenharia de Produção - UTFPR

Nauber Milicio Prestes

Engenharia Elétrica - UTFPR

Estêvão Ramiro Rômbola da Silva

Engenharia Elétrica - UTFPR

Resumo: Este estudo tem como objetivo geral analisar as diferenças, os avanços e as limitações dos reatores de fissão e fusão nuclear no contexto das energias limpas, por meio de uma revisão de literatura. Os objetivos específicos são: (1) investigar as principais diferenças entre os reatores de fissão e de fusão nuclear no contexto das energias limpas; (2) examinar os avanços tecnológicos recentes nos reatores de fissão e fusão nuclear e suas contribuições para a sustentabilidade energética; e (3) avaliar as limitações e desafios associados aos reatores de fissão e fusão nuclear, destacando suas implicações para as previsões de uma matriz energética limpa. A metodologia baseia-se em uma pesquisa exploratória e qualitativa, com levantamento bibliográfico em fontes acadêmicas e técnicas especializadas. Os resultados destacam que os reatores de fissão, apesar de amplamente utilizados, apresentam desafios associados ao gerenciamento de resíduos radioativos e à segurança operacional. Em contrapartida, os reatores de fusão, ainda em fase de desenvolvimento experimental, possuem vantagens como menor geração de resíduos e maior densidade energética, embora enfrentem barreiras tecnológicas e financeiras. Conclui-se que, apesar das limitações, ambos os tipos de reatores possuem potencial para contribuir significativamente para o desenvolvimento de energias limpas. A fissão oferece uma solução imediata, enquanto a fusão promete uma alternativa de longo prazo, com impactos ambientais reduzidos, destacando-se como um importante foco de inovação no setor energético sustentável.

Palavras-chave: Energia nuclear, Reatores de fissão, Reatores de fusão, Energias limpas, Sustentabilidade energética

Analysis of the differences, advances and limitations of nuclear fission and fusion reactors in the context of clean energy: A Literature Review

Abstract: This study aims to analyze the differences, advances, and limitations of nuclear fission and fusion reactors in the context of clean energy, through a literature review. The specific objectives are: (1) to investigate the main differences between nuclear fission and fusion reactors in the context of clean energy; (2) to examine recent technological advances in nuclear fission and fusion reactors and their contributions to energy sustainability; and (3) to evaluate the limitations and challenges associated with nuclear fission and fusion reactors, highlighting their implications for the predictions of a clean energy matrix. The methodology is based on exploratory and qualitative research, with a bibliographic survey in specialized academic and technical sources. The results highlight that fission reactors, despite being widely used, present challenges associated with radioactive waste management and operational safety. In contrast, fusion reactors, still in the experimental development phase, have advantages such as lower waste generation and higher energy density, although they face technological and financial barriers. It is concluded that, despite their limitations, both types of reactors have the potential to contribute significantly to the development of clean energy. Fission offers an

immediate solution, while fusion promises a long-term alternative with reduced environmental impacts, standing out as an important focus of innovation in the sustainable energy sector.

Keywords: Nuclear energy, Fission reactors, Fusion reactors, Clean energy, Energy sustainability.

1. Introdução

A crescente necessidade de fontes de energia sustentáveis e de baixo impacto ambiental está motivando o desenvolvimento de tecnologias que possam substituir, ou ao menos complementar, as fontes energéticas convencionais, caracterizadas por elevados níveis de emissão de carbono. Dentro desse contexto, a energia nuclear, obtida através dos processos de fissão e fusão, tem atraído atenção pelo seu potencial de geração de energia em larga escala com emissões reduzidas. Segundo Nuttall, Hitchens e Gilbert (2021), “a fissão nuclear oferece uma alternativa bem ética e confiável para a geração de eletricidade, sendo fundamental para atender à demanda energética sem comprometer os objetivos climáticos” (NUTTALL; HITCHENS; GILBERT, 2021, p. 126).

Entretanto, a fusão nuclear, considerada a “energia das estrelas” (ORGANIZAÇÃO ITER, 2023), apresenta-se como uma possibilidade ainda mais promissora para o futuro das energias limpas. A fusão tem o potencial de superar os desafios de segurança e aspectos que afetam a fissão, sendo uma alternativa que, em teoria, pode gerar energia com menor impacto ambiental. Como destaca o relatório da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA, 2022), “o desenvolvimento da fusão nuclear é um dos mais ambiciosos projetos científicos e tecnológicos do século XXI, oferecendo uma visão de longo prazo para uma fonte de energia virtualmente inesgotável e de baixo carbono” (AIEA, 2022, p. 14).

Este artigo propõe uma análise bibliográfica das diferenças, atualidades e potencialidades dos reatores de fissão e fusão nuclear, abordando o estado atual dessas tecnologias no contexto das energias limpas. Essa análise se justifica pela importância de compreender os avanços que possibilitam a transição para uma matriz energética sustentável, conforme planejado por Sovacool (2020), que destaca que “a avaliação criteriosa de todas as matrizes energéticas, incluindo a nuclear, é essencial para o planejamento de um futuro energético de baixo carbono” (SOVACOO, 2020, p. 92). Ao examinar os avanços e desafios de cada tipo de reator, o estudo contribui para a compreensão do papel dessas tecnologias no âmbito da engenharia e sustentabilidade, e para o futuro das energias limpas.

A demanda crescente por energias limpas e a urgência em reduzir as emissões de carbono colocam a energia nuclear em destaque como uma solução possível de baixo impacto ambiental. Os reatores de fissão nuclear, embora eficientes e amplamente utilizados, enfrentam desafios em relação ao gerenciamento de resíduos radioativos e à segurança. A mudança nuclear, por sua vez, promete uma alternativa com menor produção de resíduos e maior segurança, mas permanece em fase experimental devido aos altos desafios tecnológicos e financeiros (SOVACOO, 2020; NUTTALL; HITCHENS; GILBERT, 2021).

Este artigo, portanto, investiga a questão: **Como os avanços em reatores de fissão e fusão nuclear podem contribuir para o desenvolvimento de energias limpas, considerando as diferenças, vantagens e limitações de cada tecnologia?** Por meio de uma análise bibliográfica, buscamos discutir as perspectivas de cada tecnologia nuclear para integrar uma matriz energética mais sustentável.

O objetivo geral do presente estudo consistiu em analisar as diferenças, os avanços e as limitações dos reatores de fissão e fusão nuclear no contexto das energias limpas, através de uma revisão de literatura. Especificamente, buscou-se: investigar as principais diferenças entre os reatores de fissão e de fusão nuclear no contexto das energias limpas; examinar os avanços tecnológicos recentes nos reatores de fissão e fusão nuclear e suas contribuições para a sustentabilidade energética; e avaliar as limitações e desafios

associados aos reatores de fissão e fusão nuclear, destacando suas implicações para as previsões de uma matriz energética limpa.

Metodologicamente a pesquisa é exploratória, descritiva, qualitativa, através de uma revisão de literatura e levantamento bibliográfico.

Este artigo está dividido em 05 seções. A primeira, contextualiza o tema geral do trabalho, descreve rapidamente o problema que pretende solucionar ou discutir, e aponta o objetivo de sua realização. A segunda seção, traz o referencial teórico; a terceira seção apresenta a Metodologia, na quarta seção tem-se a apresentação dos dados, análise e interpretação dos resultados.

2. Referencial Teórico

A energia nuclear é amplamente reconhecida como uma potencial fonte de energia limpa, capaz de fornecer grandes quantidades de eletricidade com emissões mínimas de gases de efeito estufa. Segundo a Martin (2013), a energia nuclear, por meio dos reatores de fissão e fusão, representa uma alternativa estratégica para atender à crescente demanda energética mundial, especialmente em tempos de intensificação das mudanças climáticas. A fissão nuclear, já amplamente utilizada em diversos países, permite a geração de eletricidade pela divisão de núcleos atômicos pesados, um processo que libera grandes quantidades de energia, mas também exige métodos de gerenciamento seguro de resíduos radioativos devido ao impacto ambiental prolongado (NUCLEAR FISSION - WIKIPEDIA, 2024).

Para aprimorar a segurança e a eficiência dos reatores de fissão, Kvashnina *et al.* (2024) sugerem soluções sustentáveis para o gerenciamento de resíduos nucleares, abordando métodos que visam a redução dos efeitos negativos no meio ambiente e o armazenamento seguro desses resíduos em longo prazo. A Eletrobras Eletronuclear (2024) também salienta a importância de práticas seguras e inovadoras no contexto brasileiro, onde os reatores de fissão têm contribuído de forma significativa para a matriz energética do país.

Em contrapartida, a fusão nuclear, ainda em desenvolvimento, apresenta-se como uma alternativa promissora por gerar menores quantidades de resíduos e possuir maior densidade energética, conforme aponta Hofmann (2018). O Projeto JT-60SA, um dos maiores esforços para a realização de experimentos com fusão nuclear, destaca-se pelo uso de tecnologias avançadas que possibilitam maior controle dos parâmetros de operação e segurança, como a normalização do beta e o controle do perfil de segurança (ISHIDA *et al.*, 2011; WAKATSUKI *et al.*, 2023). Garitta *et al.* (2024) discutem o desempenho térmico e estrutural do divertor resfriado ativamente no JT-60SA, uma inovação que contribui para o desenvolvimento sustentável da fusão nuclear, visando suportar fluxos de calor elevados de forma eficiente.

No que se refere ao controle e operação dos reatores, Tepljakov *et al.* (2018) e Abdelfattah, Aseeri e Elaziz (2024) destacam o papel dos controladores FOPID (Proporcional-Integral-Derivativo Fracionário) no aprimoramento da precisão e estabilidade dos reatores nucleares. Essas tecnologias avançadas de controle oferecem maior robustez no gerenciamento dos parâmetros críticos de operação, sendo cruciais tanto para a fissão quanto para a fusão nuclear, onde a segurança e a eficiência são essenciais para o desenvolvimento de soluções nucleares sustentáveis.

Em síntese, a literatura destaca a importância dos avanços tecnológicos e de controle na operação de reatores nucleares como meios de viabilizar a energia nuclear no contexto das energias limpas. Os reatores de fissão, com foco na segurança dos resíduos, e os de fusão, com inovações de alta eficiência e baixo impacto ambiental, representam contribuições significativas para uma matriz energética mais sustentável.

3. Metodologia

A presente pesquisa é, quanto à sua natureza, exploratória, buscando aprofundar a compreensão sobre os reatores de fissão e fusão nuclear no contexto das energias limpas. Segundo Gil (2008), as pesquisas exploratórias são detalhadas para investigar evidências ainda pouco compreendidas ou complexas, possibilitando uma visão mais ampla e detalhada do tema.

Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, adota-se uma abordagem qualitativa, pois o estudo analisa e interpreta dados teóricos sobre tecnologias nucleares. Uma pesquisa qualitativa permite uma compreensão mais profunda das informações, explorando as nuances e interpretações do conhecimento estudado (MINAYO, 2001). Conforme Creswell (2014), uma pesquisa qualitativa é especialmente indicada para investigações em que se busca contextos interpretados, como o das tecnologias nucleares em energias limpas, com base em dados não numéricos.

Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa descritiva, já que busca detalhar as características, os avanços e as limitações dos reatores de fissão e fusão. Para Gil (2008), as pesquisas descritivas têm por finalidade descrever, classificar e interpretar as características de um específico, permitindo uma análise mais criteriosa dos elementos que envolvem as tecnologias tecnológicas.

Em termos de procedimentos técnicos, foi realizada uma revisão de literatura, que é uma técnica essencial para a coleta e síntese de conhecimentos já disponíveis sobre o tema, conforme Lakatos e Marconi (2003). Uma revisão bibliográfica permite identificar o estado da arte e as lacunas da literatura, oferecendo uma base sólida para discussões e reflexões fundamentais sobre os avanços e desafios da energia nuclear.

A coleta de dados foi feita por meio de levantamento bibliográfico em bases de dados acadêmicos, como Scopus, Web of Science e Google Scholar, abrangendo artigos científicos, relatórios de instituições como a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e documentos técnicos de relevância. Segundo Richardson (1999), a pesquisa bibliográfica é fundamental para sintetizar conhecimentos existentes e compreender diferentes perspectivas teóricas sobre a especificidade estudada.

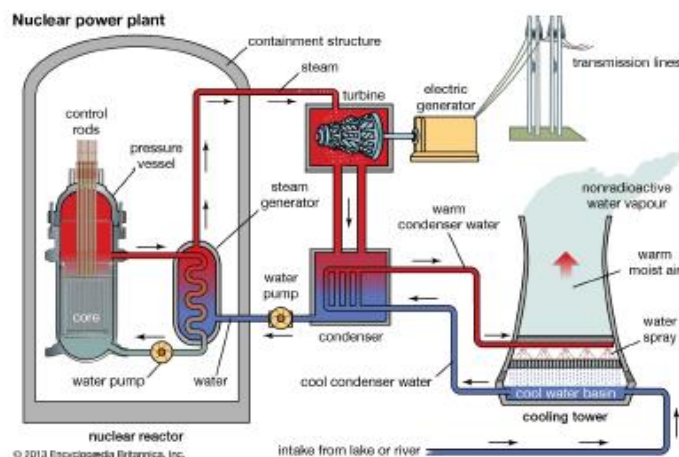
4. Apresentação dos dados, análise e discussão dos resultados

A geração por energia nuclear é considerada uma forma extremamente sustentável de geração de energia, pois possui pouca geração de emissores poluentes a atmosfera relativa a quantidade de energia que produz. Atualmente os Estados Unidos geram a maior quantidade de energia usando reatores nucleares, e a França possui a maior parcela de energia de seu país sendo gerada por reatores nucleares (Britannica, 2013 e Hofmann, 2018).

Uma usina nuclear é composta por um sistema de abastecimento de água, que é aquecida por uma reação nuclear, e então passa para um gerador de vapor, esse vapor é então utilizado por uma turbina e um gerador para transmitir energia elétrica, o vapor é livremente liberado na atmosfera, tornando o abastecimento de água, em teoria, sustentável. (Figura 1) (Martin, 2024).

O reator da usina nuclear é responsável pelo aquecimento da água, e existem duas principais famílias de reatores nucleares, os reatores por fusão e por fissão nucleares. A fusão nuclear se refere a combinação de dois átomos leves que geram um átomo maior, e a fissão nuclear se refere ao contrário, um átomo se divide em dois átomos menores, as duas reações geram um meio contínuo de temperatura elevada, fonte de energia para usinas nucleares. (Hofmann, 2018).

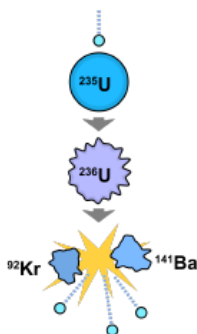
Figura 1 - Esquema de uma usina nuclear por água pressurizada



Fonte: Britannica (2013)

A geração de energia por fissão é o meio mais comum de geração de energia nuclear, utiliza primariamente compostos de urânio e plutônio como combustível. Seus reatores podem ser críticos ou subcríticos, referente ao ponto de criticalidade de seu combustível durante a fissão nuclear. O ponto de criticalidade de um material se refere a quantidade mínima de massa de um combustível nuclear necessária para alcançar uma reação em cadeia que gera a temperatura contínua necessária para geração de energia nuclear (Figura 2) (Nuclear Fission - Wikipedia, 2024).

Figura 2 - Reação por Fissão



Fonte: Domínio Público, Wikipédia (2024)

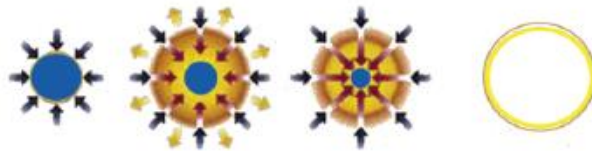
Dentre as falhas no processo de geração de energia por fissão nuclear se destacam a pouca sustentabilidade ambiental a longo prazo devido ao lixo radioativo produzido pela usina, (sendo o equipamento descartável usado por trabalhadores, rejeitos da queima do combustível e a contaminação da água) e o perigo associado ao combustível utilizado, a catástrofe de Chernobyl ilustrando bem os perigos associados a fissão nuclear.

Métodos para reduzir a quantidade e garantir o descarte seguro de lixo são tópicos muito estudados atualmente, assim como melhorias na eficiência energética e segurança de usinas em geral. (Kvashnina *et al.*, 2024).

A geração de energia nuclear por fusão é a maneira mais efetiva de se gerar energia nuclear, utiliza hidrogênio como combustível e gera em média 2 a 3 vezes mais energia do que a fissão nuclear, mas é dificilmente viável em larga escala. Foi primeiramente discutida na segunda edição da **"Geneva Conference on Atoms for Peace"** em 1958, onde se foi apresentado o método de confinamento magnético, que se tornou um dos principais métodos de geração de energia nuclear por fusão, junto com o confinamento inercial

O confinamento magnético gera energia utilizando combustíveis que foram aquecidos a ponto de se tornar plasma, o combustível é então contido e comprimido utilizando campos magnéticos, atualmente induzidos por um dispositivo experimental chamado Tokamak, permitindo o uso de sua temperatura na geração de energia. O confinamento inercial comprime e aquece recipientes de combustível, normalmente por meio de lasers, a ponto de se alcançar a fusão do material, que então pode ser usado no processo de aquecimento de um reator nuclear (Figura 3). (Hoffman *et al.*, 2018).

Figura 3 - Reação por Fissão Fases da fusão inercial: aquecimento, plasma e compressão do combustível

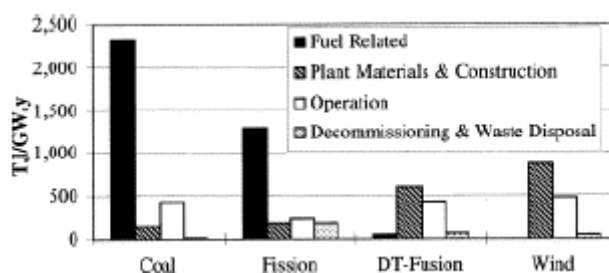


Fonte: Hoffman *et al.* (2018).

A viabilidade do uso de energia por fusão nuclear em larga escala é atualmente muito estudada por ser um método de geração de energia nuclear que não gera lixo radioativo, além de possuir um combustível muito mais seguro do que Urânio e Plutônio.

A Figura 4 ilustra as principais necessidades de cada forma de geração de energia no eixo x, sendo elas combustível, materiais e construção, operação, e impacto ambiental, respectivamente, em relação a geração de energia obtida no eixo y. (White *et al.*, 2000).

Figura 4 - Relação entre demandas e produção de energia de diferentes meios de geração de energia



Fonte: White *et al.* (2000)

2.1 Atualidades: áreas de estudo e novas tecnologias

Esta seção apresentou as áreas de estudo e novas tecnologias que vêm sendo desenvolvidas para solucionar problemas em usinas nucleares de diversos países, assim como para melhorar sua efetividade e segurança.

A. Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto

A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) é o complexo formado pelo conjunto das usinas nucleares Angra 1, Angra 2 e Angra 3, é atualmente operada pela Eletronuclear. Sua primeira usina, Angra 1, foi inaugurada em maio de 1971, e passou por um longo período de construção até entrar em operação total em dezembro de 1984.

A usina Angra 2 entrou em operação em 2001, ela foi fornecida pela Siemens - KWU, situada na Alemanha, como parte de um acordo nuclear Brasil-Alemanha. A mais recente usina, Angra 3, está atualmente em construção desde 1980 e faz parte da parceria com a Siemens, existem diversas críticas referentes a construção da Angra 3, incluindo corrupção, construção em área de desliz, e inviabilidade econômica da usina após ser construída, estimadamente em 2028. (Carvalho, 2006). Todas as usinas da CNAAA utilizam um reator

de água pressurizada, um meio de geração por fissão nuclear onde a água é abastecida em alta pressão ao reator antes de ser introduzida a etapa de evaporação. Geradores de água pressurizada podem ser avaliados como geração I ou II (Eletronuclear, 2024).

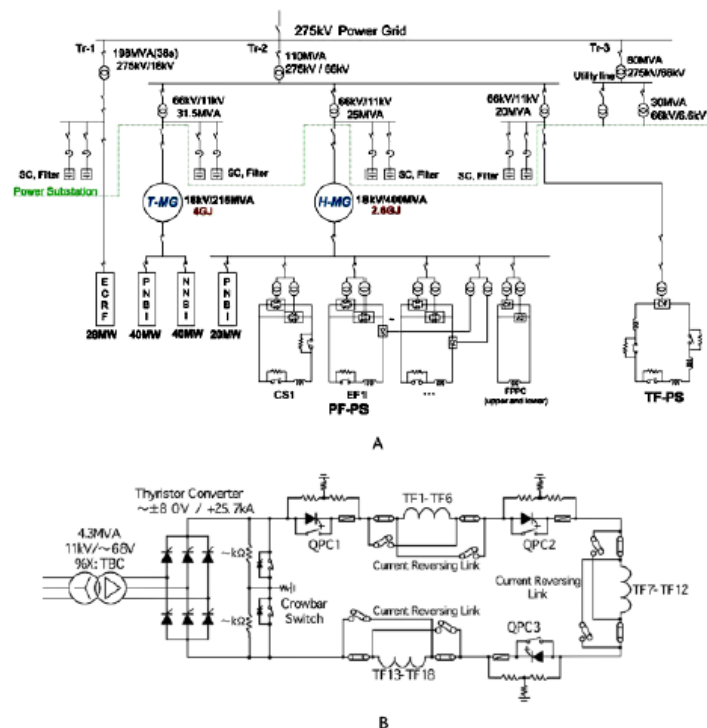
Atualmente em construção, Angra 3 será a terceira usina da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA). Com potência de 1.405 megawatts, a nova unidade será capaz de gerar mais de 12 milhões de megawatts-hora por ano, o suficiente para atender 4,5 milhões de pessoas. Deste modo, a energia nuclear passará a gerar o equivalente a 60% do consumo do estado do Rio de Janeiro e 3% do consumo do Brasil, (3495MW após a construção da Angra 3) (Eletronuclear, 2024).

B. Reator de Fusão JT-60SA

O reator JT-60SA é um reator experimental em construção conjunta entre a BAA (Broader Approach Agreement) e JNFP (Japanese National Fusion Programme), e possui como objetivo criar a primeira usina nuclear capaz de gerar energia por fusão nuclear de maneira sustentável. Ishida, *et al.* (2011) especificaram os principais parâmetros do reator que o separam de outros projetos de energia por fusão, assim como os objetivos definidos para considerar o reator como forma viável de geração de energia, sendo as principais:

1) Alimentação AC do Reator: O sistema de alimentação do reator é ilustrado detalhadamente na Figura 5, onde a potência esperada para o aquecimento é de 30MW para 60s ou 20MW para 100s. O gerador H-GM (Heating Motor Generator) utilizado irá suprir potência real e reativa a bobina PF (Poloidal Field) de acordo com as necessidades da fase atual que o reator se encontra, assim como 20MW a um sistema PNBI (Positive-ion Neutral Beam Injector) utilizado na geração do plasma. Dois sistemas PNBI separados necessitarão de 40MW cada, que serão supridos por um gerador T-MG (T Coil Motor Generator). O sistema ECRF, mais bem detalhado em seguida, necessitará de 28MW, que serão disponibilizados pela linha comercial de 275kV. (Ishida, 2011)

Figura 5 - A: Circuito de alimentação do JT-60SA; e B: Circuito da bobina TF

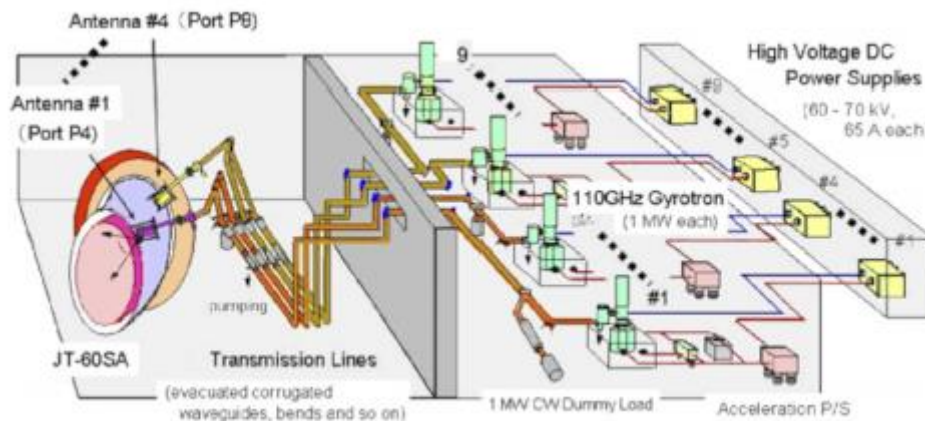


Fonte: Ishida *et al.* (2011)

2) Sistema ECRF: O sistema ECRF é responsável pela geração de plasmas de alta performance, pelo startup do plasma utilizando o menor valor de tensão necessária, e na

limpeza da primeira parede do VV. Seu circuito é detalhado na Figura 6, inicialmente injetará 3MW de potência a 110GHz no plasma do reator por meio de 4 girotrons, que são válvulas termiônicas capazes de induzir radiação por micro-ondas. Dois girotrons funcionarão por 5s como especificado, e outros 2 serão combinados para funcionar por 100s. Na etapa final do desenvolvimento do reator, os dois girotrons de 5s serão convertidos para funcionar por 100s, e cinco novos girotrons serão instalados, totalizando 7MW injetados no plasma por 100s. (Ishida, 2011).

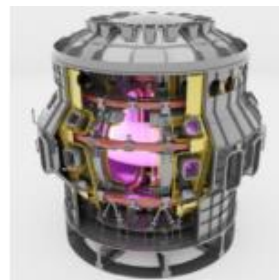
Figura 6 - Layout do sistema de ECRF



Fonte: Ishida et al. (2011)

Um dos principais desafios de reatores de fusão passados foi o dano a longo prazo na estrutura do tokamak do reator causado pelas altas temperaturas da fusão nuclear, o JT-60SA prevê uma solução para esse problema utilizando compósitos proprietários em sua estrutura, desenvolvido em uma colaboração entre Fusion for Energy e CEA. (Garitta et al., 2024).

Figura 7 - Tokamak do reator JT-60SA



Fonte: Garitta et al. (2024).

Porém, Garitta et al. (2024) realizaram uma análise estrutural e térmica do reator JT-60SA, em específico os sistemas de refrigeração do reator, denominados ACD (Actively Cooled Divertor), os sistemas utilizarão grafite como carcaça e TZM ou CuCrZr como dissipador de calor. Os autores (2024) levaram em consideração o estresse do combustível já em estado de plasma, que gera um fluxo de 10 MW/m, a carga eletromagnética causada pelo plasma, e a pressão da água durante o resfriamento, com especificações de 2 MPa, 7 m/s a 40°C.

Foi concluído no estudo realizado pelos autores (2022) que o estresse eletromagnético não influenciará o funcionamento do reator, e que os danos causados pela temperatura do reator são aceitáveis, mas caso o reator sofra estresse transiente pelo fluxo do plasma estimado como 15MW/m, os parafusos da estrutura não serão capazes de resistir[10]. Eles concluem que o reator JT-60SA necessita de melhores considerações na construção de seu sistema de refrigeração. Os autores (2024) também reconhecem que as poucas informações e estudos do material TZM utilizado, assim como propriedades térmicas do

grafite, reduzem a precisão de estudos do reator e podem ser áreas de interesse para avanços futuros em reatores de fusão.

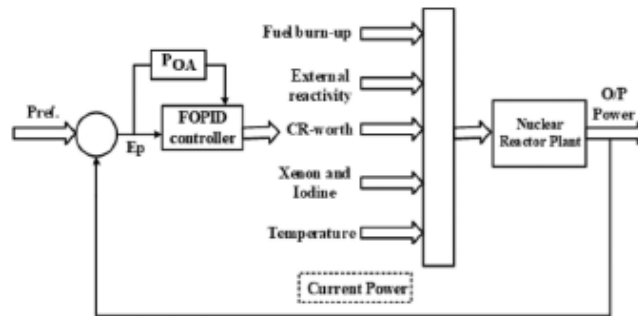
C. Controle de Reatores Nucleares no Egito

O sistema de controle de um reator nuclear é uma parte extremamente importante de seu funcionamento seguro e eficiente, avanços em algoritmos de controle permitem ajustes mais precisos e rápidos de posição e quantidade de combustível nuclear, como consequência aumentando a eficiência energética da usina em geral. Por isso o seu estudo é uma área atualmente pesquisada na construção de novos reatores (Ishida *et al.*, 2011).

Abdelfattah *et al* (2024) criaram um algoritmo de controle, denominado POA-M-FOPID, que é uma melhoria de um controlador FOPID (Fractional Order Proportional Integral Derivative) junto a um POA-M (Planet Optimization Algorithm) com o objetivo de melhorar a eficiência do reator de uma usina nuclear (Figura 8). O reator utilizado para medir a eficiência do algoritmo pelos autores foi o ETRR-2 (Egyptian Testing Research Reactor).

Os autores (2024) utilizaram 03 (três) diferentes modelos para medir a eficiência e falhas dos algoritmos POA, POA-M, AOA, e Figura 8. Sistema de Controle do reator ETRR-2. (Abdelfattah *et al.*, 2024).

Figura 8 - Sistema de Controle do reator ETRR-2



Fonte: Abdelfattah *et al.* (2024).

PSO quando calibrando um controlador FOPID em uma usina nuclear, Sendo eles:

1) Reactor point kinetic model: O modelo RPKM (Reactor point kinetic mode) é um método matemático utilizado para descrever o comportamento da população de nêutrons de um reator nuclear com o passar do tempo. O método é composto por duas equações diferenciais. A equação 1 descreve a variação da população com o passar do tempo:

$$\frac{dn}{dt} = \left[\frac{\rho - \beta}{\Lambda} \right] n + \sum \lambda_i C_i \quad (1)$$

A equação 2 descreve a concentração de cada grupo de fragmentos de fissão com o passar do tempo:

$$\frac{dC_i}{dt} = \left(\frac{\beta_i}{\Lambda} \right) n - \lambda_i C_i \quad (2)$$

As duas equações ajudaram a análise de fragmentos de fissão do reator ETRR-2 com o passar do tempo, importante pois tais fragmentos são responsáveis pela instabilidade que causa a reação em cadeia que separa os nêutrons de urânio, o que gera a energia utilizada pelo reator.

2) Poisons Model: Durante o processo de fissão do reator, o lodo natural do ar aumenta a concentração de Xenônio do ambiente, que é responsável pela produção de um isótopo indesejado durante o funcionamento do reator, o Xe135. Logo, a variação da concentração

de Iodo e Xenônio com o passar do tempo é de interesse para o funcionamento adequado do reator, o que pode ser representado pelas equações 3 e 4:

$$\frac{dI}{dt} = \Gamma_i \Sigma_i \Phi_t - \lambda_i I \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = \Gamma_x \Sigma_i \Phi_t + \lambda_i I - \lambda_i x - \sigma_x \Phi_x \quad (4)$$

3) Control rod model: Modelo que representa a reatividade do núcleo do reator. O feedback causado pela reatividade do reator causa variações de temperatura no combustível e na concentração de Xenônio, portanto a análise da reatividade do reator é importante para o funcionamento do reator, e é representada pela equação 5:

$$\rho = \rho_r + a_f(\delta T_f) + ac(\delta T_c) + \rho_{xenon} + \rho_{ext} \quad (5)$$

O quadro 1 descreve as variáveis utilizadas nas equações, que foram obtidas pelos autores (2024) com o sensoriamento do reator.

Quadro 1: Descrição das variáveis utilizadas nas equações

Variável	Descrição	Unidade
β	Fração efetiva do nêutron	-
Γ_i	Ganho de fissão do iodo	-
Γ_x	Ganho de fissão do xenônio	-
Λ	Tempo de regeneração do nêutron	segundos (s)
λ	Constante de decaimento do precursor	segundos ⁻¹ (s ⁻¹)
Φ	Fluxo térmico do nêutron	nêutrons/cm ² /s
ρ	Reatividade total	-
Σ	Fissão macroscópica média	cm ⁻¹
σ	Seção transversal do fluxo térmico do nêutron	cm ²
C	Densidade do precursor	nêutrons/cm ³
n	Densidade do nêutron	nêutrons/cm ³

Fonte: Adaptada pelos autores (2024).

Os algoritmos foram testados pelos métodos definidos, cada um deles 100 vezes, utilizando as medidas específicas do reator ETRR-2, e o resultado obtido indica que o algoritmo POAM possui a melhor performance com um controlador FOPID dentre os estudados, significativamente reduzindo o tempo de estabilização do reator por 25.27 segundos e overshoot máximo por 0.67%.

Os autores concluem que o uso comercial do algoritmo pode melhorar a eficiência de usinas nucleares compatíveis com o reator ETRR-2 estudado, como a usina em construção El Dabaa, no Egito, onde os autores realizaram o estudo. Eles recomendam a utilização de IA para obter melhores resultados, assim como a aplicação do algoritmo em outras áreas da usina como a turbina e o reator, como formas de avançar usinas nucleares no futuro. (Abdelfattah *et al.*, 2024).

5. Considerações Finais

5.1 Conclusão

Este artigo abordou as diferenças, avanços e limitações dos reatores de fissão e fusão nuclear no contexto das energias limpas, com o objetivo de analisar como essas tecnologias podem contribuir para uma matriz energética sustentável. Para atingir esse objetivo, foi realizada uma revisão de literatura, explorando estudos científicos e relatórios especializados sobre os principais aspectos dessas tecnologias nucleares.

Os resultados destacam que, enquanto a fissão nuclear já desempenha um papel significativo na geração de energia, enfrenta desafios relacionados à segurança e ao gerenciamento de resíduos radioativos. Em contrapartida, a fusão nuclear, ainda em fase experimental, mostra-se promissora pela menor produção de resíduos e maior eficiência energética, mas enfrenta obstáculos técnicos e financeiros para se tornar viável em larga escala.

Como limitação, o estudo concentrou-se em uma análise teórica e não abordou estudos empíricos sobre a implementação das tecnologias nucleares em diferentes contextos energéticos.

Conclui-se que ambas as tecnologias têm potencial para contribuir para a sustentabilidade energética: a fissão como uma solução de curto a médio prazo e a fusão como uma alternativa de longo prazo. Esse trabalho contribui para a compreensão das possibilidades e limitações dos reatores nucleares, incentivando futuras pesquisas e inovações no desenvolvimento de tecnologias nucleares sustentáveis.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

Trabalhos futuros poderiam explorar análises empíricas da aplicação prática dos reatores de fissão e fusão em diferentes cenários energéticos, considerando variáveis como viabilidade econômica, impactos ambientais específicos e aceitação pública. Além disso, estudos focados em melhorias tecnológicas para reduzir os custos e aumentar a segurança dos reatores de fusão seriam valiosos para avaliar o potencial de implementação dessa tecnologia em larga escala.

Outra linha de pesquisa interessante seria o desenvolvimento de modelos comparativos entre diferentes fontes de energia limpa, incluindo a nuclear, para identificar os contextos mais promissores para sua integração sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e Brasil (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Os autores também agradecem a Unidade de Investigação em Governança, Competitividade e Políticas Públicas (GOVCOPP), Universidade de Aveiro, Portugal.

Referências

ABDELFATTAH, Hany; ASEERI, Ahmad O.; EL AZIZ, Mohamed Abd. Optimized FOPID controller for nuclear research reactor using enhanced planet optimization algorithm. **Alexandria Engineering Journal**, v. 97, p. 267-282, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.04.021>. Acesso em: 01 nov. 2024.

AIEA. **Energia de fusão para a paz e o desenvolvimento sustentável: um relatório da Agência Internacional de Energia Atômica**. Viena: Agência Internacional de Energia Atômica, 2022.

CARVALHO, J. F. de. O governo brasileiro deve retomar as obras da usina nuclear de Angra 3? Por um programa nuclear brasileiro. **Folha de S. Paulo**, 17 jun. 2006. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/opiniao/fz1706200609.htm>. Acesso em: 20 maio 2024.

CRESWELL, JW **Desenho de pesquisa: abordagens qualitativas, quantitativas e de métodos mistos**. 4. ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2014.

ELETRONUCLEAR. **Angra 1**. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Paginas/Angra-1.aspx>. Acesso em: 01 nov. 2024.

ELETRONUCLEAR. **Angra 2**. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Paginas/Angra-2.aspx>. Acesso em: 01 nov. 2024.

ELETRONUCLEAR. **Angra 3**. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Paginas/Angra-3.aspx>. Acesso em: 01 nov. 2024.

GARITTA, S.; BATAL, T.; DURIF, A.; FIRDAOUSS, M.; MISSIRLIAN, M.; ROCHE, H.; TESTONI, P.; TOMARCHIO, V.; RICHOU, M. Thermal and structural analysis of JT-60SA actively cooled divertor target submitted to high heat flux. **Fusion Engineering and Design**, v. 199, p. 114133, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.114133>. Acesso em: 01 nov. 2024.

GIL, AC **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HOFMANN, Ingo. Revisão da fusão nuclear de íons pesados conduzida por acelerador. **Matter and Radiation at Extremes**, v. 3, p. 1–11, 1 jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mre.2017.12.001>. Acesso em: 01 nov. 2024.

ISHIDA, S.; BARABASCHI, P.; KAMADA, Y.; JT-60SA Team. Overview of the JT-60SA project. **Nuclear Fusion**, v. 51, n. 9, p. 094018, ago. 2011. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/51/9/094018>. Acesso em: 01 nov. 2024.

KVASHNINA, K.; CLARET, F.; CLAVIER, N.; LEVITSKAIA, T. G.; WAINWRIGHT, H.; YAO, T. Long-term, sustainable solutions to radioactive waste management. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 5907, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55911-y>. Acesso em: 01 nov. 2024.

LAKATOS, EM; MARCONI, MA **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MARTIN, William. **Nuclear Power**. Encyclopedia Britannica, 20 de outubro de 2024. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/nuclear-power>. Acesso em: 01 nov. 2024.

MINAYO, MC de S. **O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde**. São Paulo: Hucitec, 2001.

NUTTALL, WJ; GILBERT, P. Inovação em energia nuclear: da fissão à fusão. **Energy Policy**, v. 149, p. 126-138, 2021.

ORGANIZAÇÃO DO ITER. **ITER: O caminho para uma nova energia**. 2023. Disponível em: <https://www.iter.org/>. Acesso em: 30 out. 2024.

RICHARDSON, RJ. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3.ed. São Paulo: Atlas, 1999.

SOVACOOOL, BK Energia limpa no século XXI: A promessa e os perigos da energia nuclear. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 45, p. 89-110, 2020.

TEPLJAKOV, Aleksei; ALAGOZ, Baris Baykant; YEROGLU, Celaeddin; GONZALEZ, Emmanuel; HOSSEINNIA, S. Hassan; PETLENKOV, Eduard. FOPID controllers and their industrial applications: A survey of recent results. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 4, p. 25-30, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.014>. Acesso em: nov. 2024.

WAKATSUKI, T.; YOSHIDA, M.; NARITA, E.; SUZUKI, T.; HAYASHI, N. Simultaneous control of safety factor profile and normalized beta for JT-60SA using reinforcement learning. **Nuclear Fusion**, v. 63, n. 7, p. 076017, maio 2023. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/1741-4326/acd393>. Acesso em: 01 nov. 2024.

WIKIPEDIA. **Nuclear fission**. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Fiss%C3%A3o_nuclear. Acesso em: 01 nov. 2024.