

Tokamak e a busca pela fusão: análise das instabilidades MHD e soluções de engenharia

Divisão Temática

DT 3 – Inovação, tecnologia e processos produtivos

Autores: C. F. B. MACHADO¹

Resumo:

Este estudo analisa o potencial do reator Tokamak como fonte de energia limpa e sustentável por meio da fusão nuclear controlada. O objetivo é compreender as instabilidades magnetohidrodinâmicas (MHD) que comprometem o confinamento do plasma e propor soluções de engenharia para reduzi-las. A metodologia baseou-se em pesquisa bibliográfica com artigos, dissertações e relatórios sobre física do plasma, funcionamento de Tokamaks e instabilidades associadas. Os resultados indicam que as principais causas das instabilidades são a alta pressão, o desalinhamento de correntes e a resistividade do plasma, que geram ilhas magnéticas e provocam a perda prematura de partículas alfa, reduzindo a eficiência do reator. Observou-se que o uso de sistemas criogênicos com hélio líquido a 4 K nas bobinas supercondutoras reduz perdas resistivas e estabiliza o campo magnético, atenuando variações térmicas e flutuações MHD. Assim, a criogenia mostra-se uma alternativa promissora para aumentar o tempo de confinamento e a estabilidade do plasma, aproximando a fusão nuclear de uma aplicação prática e eficiente na geração de energia limpa.

Palavras-chave: *Energias Limpas; Fusão nuclear; Tokamak; Plasma; Criogenia.*

Introdução

A crescente crise energética global e os impactos das mudanças climáticas impõem a busca urgente por fontes de energia limpas, abundantes e contínuas. Enquanto combustíveis fósseis elevam as emissões de gases de efeito estufa e energias renováveis lutam contra a intermitência, a fusão nuclear começa a aparecer como uma solução promissora: ao unir núcleos leves, tipicamente deutério e trítio, ela libera enormes quantidades de energia sem produzir resíduos indesejáveis.

Para que essa reação ocorra, é necessário criar condições extremas que permitam aos núcleos atômicos se aproximarem o suficiente para vencer a repulsão eletrostática natural entre suas cargas positivas. Isso exige que o combustível seja aquecido a temperaturas elevadíssimas, entre 100 e 150 milhões de graus Celsius, formando um plasma altamente energizado, no qual as partículas se movem com velocidade suficiente para que a fusão aconteça de forma eficiente e sustentada.

¹ Estudante do ensino médio do Colégio Bom Jesus Divina Providência, caiofbm2008@gmail.com

Diversos estudos sobre a viabilidade da produção de energia por fusão nuclear vêm sendo realizados desde a época da Guerra Fria, período em que a fusão era investigada principalmente para fins bélicos. Foi também nesse contexto que surgiu o primeiro projeto voltado à fusão controlada, baseado em um conceito de engenharia conhecido como Tokamak, que é uma câmara toroidal equipada com bobinas magnéticas para o confinamento do plasma.

Com os avanços tecnológicos e o acúmulo de conhecimento das últimas décadas, tornou-se possível criar, em laboratório, as condições ideais para que átomos de trítio e deutério sofram fusão de forma controlada aqui na Terra. Porém, apesar dos progressos, os cientistas ainda enfrentam desafios significativos para transformar a fusão em uma fonte eficiente, do ponto de vista energético, e de conversão do calor gerado em energia utilizável.

Dentre esses desafios, destaca-se a perda prematura de partículas alfa (núcleos de hélio-4), produto da reação de fusão. Essas partículas, idealmente, devem permanecer confinadas no plasma o tempo suficiente para transferir sua energia cinética ao meio, contribuindo para a manutenção da temperatura necessária à continuidade da reação. A fuga antecipada dessas partículas reduz substancialmente a eficiência do processo, dificultando a obtenção do chamado ponto de ignição e comprometendo a auto sustentação energética do sistema.

Fundamentação teórica

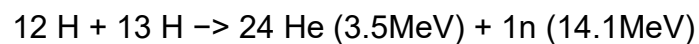
O estudo do funcionamento dos reatores de fusão baseia-se no entendimento do Tokamak, um dispositivo experimental destinado ao confinamento de plasma por meio de campos magnéticos intensos, com o objetivo de promover reações de fusão nuclear controlada. Trata-se de uma estrutura toroidal, ou seja, em forma de anel, que emprega bobinas magnéticas para gerar campos toroidais e uma corrente induzida no próprio plasma para gerar campos poloidais, mantendo o plasma quente confinado no centro da câmara e afastado das paredes. Essa configuração permite simular, em escala laboratorial, as condições extremas necessárias para que núcleos atômicos façam fusão, liberando grandes quantidades de energia, como indica Fernandes (2016).

O conceito de tokamak foi desenvolvido na União Soviética, no final da década de 1950, como resposta aos inúmeros desafios enfrentados pelas primeiras tentativas de confinamento de plasma por métodos alternativos, como o "pinch" e o "stellarator". Os físicos Igor Tamm e Andrei Sakharov, sob a direção de Lev Landau, propuseram uma

abordagem baseada na geometria toroidal com campos magnéticos cruzados para estabilizar o plasma.

Atualmente, o projeto em desenvolvimento é o ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), um esforço colaborativo entre mais de 30 países. O ITER, em construção no sul da França, visa demonstrar a viabilidade científica e técnica da fusão nuclear como fonte de energia, com a expectativa de gerar dez vezes mais energia do que a consumida para aquecer o plasma ($Q \geq 10$).

O tokamak é amplamente utilizado como plataforma de pesquisa em física de plasmas e energia de fusão. Em sua operação, gases como deutério (^2H) e trítio (^3H) são injetados na câmara toroidal, onde são ionizados e aquecidos a temperaturas superiores a 100 milhões de graus Celsius, condições semelhantes às do núcleo do Sol. Nessas temperaturas, os núcleos atômicos possuem energia cinética suficiente para superar a barreira de repulsão eletrostática (barreira coulombiana) e colidir, fundindo-se e formando hélio (^4He) e liberando um nêutron livre, conforme a reação:



A energia gerada pelos nêutrons é absorvida pelas paredes do reator e pode ser convertida em eletricidade por meio de sistemas convencionais, como turbinas a vapor. Um exemplo notável do uso prático desse princípio é o experimento recente no JET, que em 2022 atingiu um recorde mundial de produção de energia por fusão sustentada por 5 segundos, totalizando 59 megajoules de energia, afirma Fleschner (2024).

Procedimentos metodológicos

Essa é uma pesquisa bibliográfica, realizada em bases de dados de artigos e relatórios, além de repositórios de universidades. Foram incluídos artigos e documentos que atendessem aos seguintes critérios: publicação em periódicos revisados por pares, no período de 2000 a 2025; enfoque na física do confinamento magnético, no funcionamento de Tokamaks e em aspectos teóricos e práticos das instabilidades do plasma. Após a seleção, as fontes foram organizadas em quatro categorias principais: (i) trabalhos referentes aos aspectos de engenharia e funcionamento do Tokamak e (ii) investigações sobre as instabilidades responsáveis pela perda prematura de partículas alfa.

Resultados e discussões

Os estudos revisados indicam que o plasma, por ser um fluido condutor e naturalmente instável, requer múltiplos métodos de aquecimento — como o ôhmico, a injeção de partículas neutras e o uso de ondas de rádio — para atingir as condições de fusão. Conforme Fernandes (2016), o autoaquecimento pelas partículas alfa é essencial para a autossustentação do processo, porém as instabilidades e turbulências ainda representam um dos maiores desafios para manter o equilíbrio do plasma.

A partir do estudo das análises feitas por Fernandes (2016), no TCABR, em seu trabalho “Instabilidades MHD no tokamak TCABR”, é possível entender que a principal causa da perda de eficiência em um tokamak são as instabilidades magnetohidrodinâmicas (MHD), que surgem principalmente da alta pressão do plasma, que desloca o gradiente para fora do campo magnético ideal, gerando perturbações conhecidas como ilhas magnéticas. Outros fatores incluem o desalinhamento entre as correntes toroidais e poloidais, a não homogeneidade do campo magnético, que faz íons e elétrons derivarem em sentidos opostos, e a resistividade natural do plasma, que possibilita reconexões magnéticas e instabilidades do tipo tearing mode. Essas perturbações resultam em perda prematura de partículas alfa, redução do tempo de confinamento e, em casos extremos, disrupções abruptas que colapsam o confinamento e danificam as paredes do reator. Segundo Fernandes (2016), o comportamento do plasma pode ser descrito matematicamente a partir da força de Lorentz e de derivações que consideram forças externas, revelando a forte dependência das instabilidades em relação ao campo magnético. Nesse contexto, estudos como o de Vaghela *et al.* (2021) apontam a criogenia das bobinas supercondutoras como solução promissora: o resfriamento com hélio líquido a 4 K reduz perdas resistivas e estabiliza o campo magnético, minimizando variações térmicas e evitando perturbações locais que desencadeiam modos MHD. Assim, o uso de sistemas criogênicos eficientes não apenas diminui a dissipação de energia para o ambiente, mas também aumenta a estabilidade do confinamento magnético, favorecendo o equilíbrio do plasma e a eficiência global do reator de fusão.

Considerações finais

Este trabalho procurou reunir diversas fontes de autores para exemplificar o estado dos estudos sobre fusão nuclear por tokamak e apontar as dificuldades ainda presentes

para a produção de energia líquida e apresentando possíveis formas de mitigar o problema. A partir disso, foi possível analisar o funcionamento de confinamento do plasma em Tokamaks e os problemas que impossibilitam alcançar um fator $Q > 1$. Encontrou-se assim o fator comum a todas as derivas e propõe-se, como possível solução, o resfriamento das bobinas por criogenia, utilizando de plantas criogênicas porosas que se moldam às geometrias complexas das bobinas. Entretanto, ainda com todos esses mecanismos de base teórica, não se pode afirmar que essas mudanças proporcionarão rendimento energético sem testes empíricos.

O estudo realizado também objetiva facilitar a compreensão do tema e incentivar a realização de novas pesquisas, preservando a esperança de viabilizar uma fonte de energia limpa e renovável. Espera-se que os avanços resultantes beneficiem diversos ramos da engenharia e contribuam para atenuar a atual crise energética.

Referências

FERNANDES, Tiago. *Instabilidades MHD no tokamak TCABR*. 2016. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Departamento de Física Aplicada, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

FLESCHNER, Frank. *Nuclear fusion: European joint experiment achieves energy record*. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 8 fev. 2024.

LOPES, Edilton José. *Fusão nuclear na produção de energia do Sol: uma possibilidade do tunelamento quântico e um caminho promissor para o planeta*. 2023. Dissertação, Manaus, 2023.

SAVISKI, Samuel de Oliveira Fajardo. *Uma abordagem didática com enfoque na história da física do plasma por meio da aprendizagem significativa*. 2014. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática), Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

VAGHELA, Hitensinh; LAKHERA, Vikas J.; SARKAR, Biswanath. Forced flow cryogenic cooling in fusion devices: A review. *Heliyon*, v. 7, n. 1, p. e06053, jan. 2021.