



Introdução a Física de Plasmas e Reatores de Fusão Nuclear

Felipe M R Pfahl*
University of Brasilia

O artigo em questão é uma apresentação sobre a teoria de fusão nuclear acompanhada com a física de plasmas para entender a importância para os reatores de fusão nuclear. Ao longo do texto é discutido sobre como a fusão nuclear funciona e como os reatores utilizam do plasma para gerar essas reações. Além disso, é abordado os principais reatores utilizados na atualidade para realizar fusão nuclear. Dessa forma, dando uma pequena introdução sobre como essa pode ser a energia limpa do futuro.

Keywords: Fusão nuclear, Física de plasmas, Reatores de fusão nuclear

I. INTRODUÇÃO

A fusão nuclear, desde a época que foi descoberta, intriga a humanidade sobre as suas possibilidades quase fictícias de geração de energia. A ideia de utilizar uma quantidade de energia para gerar mais energia é curiosa. Contudo, para dar entrada a esse tipo de física é necessário saber os principais pontos de partida, física dos plasmas, e saber até onde a humanidade já chegou com a engenharia que temos até o momento, reatores de fusão.

A princípio deve-se entender do que se trata a reação de fusão nuclear na física e compreender seu potencial energético, pois tal reação possui a capacidade de utilizar da energia de ligação dos núcleons (prótons e nêutrons) para gerar energia, como ocorre no sol [1]. Além disso, para desenvolver o básico da fusão nuclear é necessário entender qual o estado a matéria se encontra para ocasionar a mesma, o plasma. Desse modo, será apresentado uma breve introdução a dinâmica de plasmas no contexto apresentado, devido o plasma ser a melhor forma de se obter a reação de fusão nuclear. [2]

Outrossim, como a tecnologia e ciência estão intrinsecamente ligadas, a apresentação dos tipos de reatores que são usados atualmente é de extrema importância, uma vez que eles mostram onde se encontra a pesquisa e como se desenrolará o futuro da fusão nuclear. [1]

Por fim, esse trabalho tem como intuito introduzir o leitor aos conceitos básicos de fusão nuclear e física de plasmas, juntamente com a capacidade de apresentar os principais sistemas de realização de fusão implementados nos dias atuais, podendo assim, influenciar na obtenção de uma energia completamente limpa no futuro.

II. CONCEITOS BÁSICOS

A. Fusão Nuclear

Inicialmente, tem que se entender do que se trata a fusão nuclear. J.A. Bittencourt defini fusão como junção de dois átomos leves que, após uma quantidade de energia fornecida, formam um terceiro átomo pesado, sendo que sua massa não podendo ultrapassar a soma das massas dos outros dois átomos leves. Essa diferença é transformada em energia de acordo com equação Einstein:

$$E = mc^2 \quad (1)$$

Definido E como energia, m como massa do átomo e c a velocidade da luz no vácuo. Assim, essa diferença é determinante para os reatores de fusão nuclear, pois é essa energia remanescente que será usada para gerar mais fusão nuclear e ser utilizada para demais fins. [3]

Nos reatores de fusão, a reação do Deutério e do trítio (2) é a mais estudada e a mais aplicada para esse fenômeno, pois possui a menor energia de ignição e é a que mais gera energia por núcleon. [4]



Ainda que seja a mais estudada, a complexabilidade de execução dessa reação é notável, principalmente, devido as condições necessárias para que ela ocorra. Assim, para entender quais são esses empecilhos que dificultam o desenvolvimento dessa fonte de energia, é essencial compreender a física de plasmas. [2]

* felipepfahl2108@gmail.com

B. Plasma

A definição mais breve que se pode ter de plasmas é: um conjunto de gases ionizados separados em elétrons e íons de suas origens. Além disso, eles devem ter caráter coletivo para serem considerados plasmas, pois isso será utilizado para aplicar características de fluidos aos mesmos. Para que a ionização deseje aconteça é utilizado a equação de Saha (3) que determina o grau de ionização de um gás que vai permitir a realização da fusão[2]:

$$\frac{n_i}{n_n} \simeq 2.405 \cdot 10^{21} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_i} e^{-\frac{U_i}{K T}} \quad (3)$$

Nessa equação, n_i e n_n representam as densidades de íons e de partículas neutras, respectivamente. T é a temperatura, K é a constante de Boltzmann e U_i é a quantidade de energia para retirar o elétron mais externo do átomo em questão. Desse modo, por meio dessa equação, podemos definir os requisitos mínimos para os reatores, devido a fusão ocorrer quando o grau de ionização for muito maior que um.[2]

Pode se inferir, por meio da equação de Saha, que a temperatura possui muita relevância na produção de um plasma, pois ela aparece duas vezes na equação, podendo dizer que esta diretamente proporcional ao grau de ionização do plasma. Assim, quanto mais quente o plasma, mais ionizado ele se torna. [2]

Sabendo disso, na física de plasmas a temperatura é definida pelo teorema de equipartição de energia, aonde a energia da partícula esta ligada a sua temperatura, ou seja a energia cinética da partícula esta ligada a sua temperatura pela simplificada distribuição Maxwelliana(4) que pode ser demonstrada no Chen.

$$E = \frac{3KT}{2} \quad (4)$$

Em síntese, se temos uma partícula com 1eV ela tem 11.600°K de temperatura. Demonstrando que para um gás ter uma ionização boa(muito maior que 1) tem que haver uma temperatura alta o suficiente. Contudo, uma vez que o gás esta com uma ionização adequada todo o seu sistema de controle é baseado nas leis do eletromagnetismo e na dinâmica de fluidos newtonianos, mesmo que em temperaturas altas.[2]

III. TIPOS DE REATORES

Os reatores usados para realizar fusão nuclear , ainda que não produzam energia efetiva, possuem diversos modelos e tipos diferentes de aplicações e físicas relacionadas, sendo os mais usados os de confinamento magnético e os modelos inerciais.[4]

A. Confinamento Magnético

Utilizando de magnetismo avançado e dinâmica de fluidos avançada podemos confinar o plasma em uma camará, normalmente toroidal(rosquinha), por meio de eletroímãs grandes e potentes para gerar uma corrente dentro do plasma. Esse tipo de reator é chamado de tokamak sendo os principais representantes dessa categoria. Os reatores de confinamento magnético são baseados em confinar o plasma dentro de uma capsula para aquece-lo por meio do campo magnético dos eletroímãs acoplados a capsula, deste modo aquecendo, por meio de correntes produzidas no plasma, e distribuindo ele da maneira correta para realizar a fusão nuclear.[3]

A principio, a física por trás desse modelo aparenta ser simples, contudo, sua complexabilidade é muito avançada. Por se tratar de uma substancia muito caótica e quente(Alguns podendo chegar na casa dos 12eV, aproximadamente 139.200 °K [5]), o plasma é muito complexo de se controlar e de se manter estável e isso pode ocasionar em erros durante a realização da fusão, erros esses que podem danificar a maquina e em casos inutilizar a mesma.[2]

Entretanto, isso não impede que haja muitos exemplos de reatores desse tipo, pois trata-se do modelo mais usado atualmente para obter fusão nuclear. Os tokamaks, já citados, possuem característica de ter uma câmara em formato toroidal ou esférica com uma distribuição simétrica por todo o equipamento, utilizando um conjunto de eletroímãs potentes em todo o seu caráter estrutural.[3] O principal representante que servem de exemplo é o ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor) que será o maior tokamak ja feito, com o maior potencial da historia[6]. Além desse, há no Brasil um tokamak na Universidade de São Paulo conhecido como TCABR , onde o brasil contribui para esse futuro.[7]

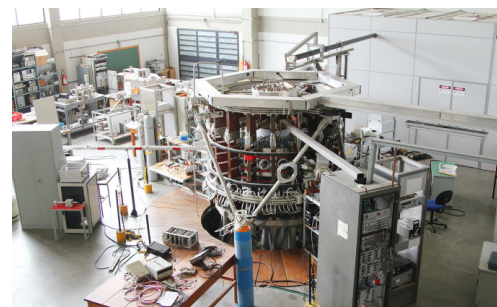


Figure 1. Foto do Tokamak da USP TCABR

Os outros representantes dessa categoria de reatores são os Stellarators. Sua base teórica é a mesma dos tokamaks , mas seu formato é diferente e o mesmo não necessita de tantos eletroímãs que o seu semelhante. Além

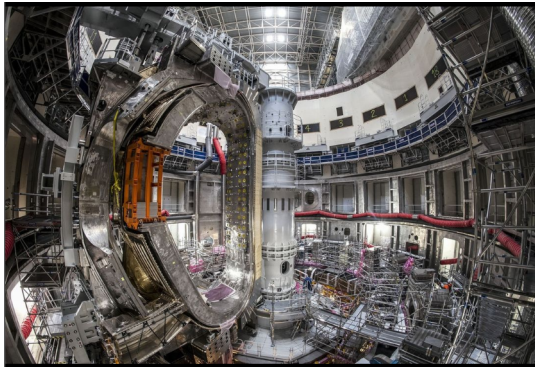


Figure 2. Foto da área de construção do ITER

disso, pelo fato dele não precisar de tantos eletroímãs, ele consegue produzir plasma com menor dificuldade e menor quantidade de energia necessária. Esses fatores se dão pela sua geometria diferenciada e com características únicas de torção e guia do plasma.[8]

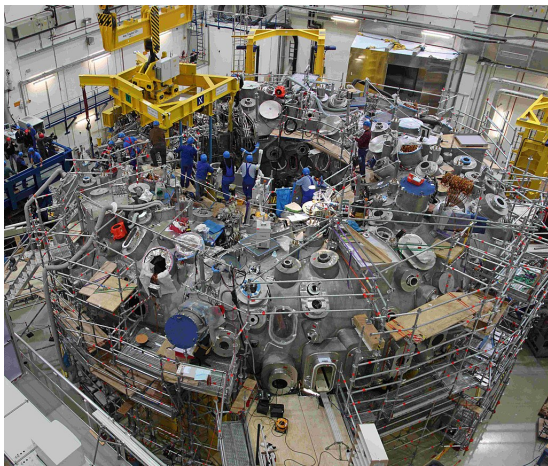


Figure 3. Foto do Stellarator Wendelstein 7-X

B. Inerciais

Mudando de panorama, nos temos os reatores de caráter inercial. Esses em específico não necessitam unicamente da física de plasmas, mas também da física de ondas, pois eles se baseiam em utilizar amplificadores de

lasers(ondas eletromagnéticas) , ou seja, um laser super energético. O laser , com 500 trilhões de Watts, atinge a esfera de deutério de trítio, que está há $18^{\circ}\text{K}(-255^{\circ}\text{C})$, de maneira uniforme fazendo-a aquecer e mudar sua composição de densidade, assim obtendo a fusão nuclear na esfera, dependendo do tipo, destruindo a esfera ou mudando sua composição.[1]

Para realizar o funcionamento desse tipo de reator é preciso muito conhecimento de física de ondas e eletromagnetismo ,ambas com suas interações na matéria. Além disso, esse tipo de reator possui um custo menor por kWh que o de confinamento magnético. Dentre os seus representantes, o principal é o NIF (National Ignition Facility) que possui um dos amplificadores de laser mais potentes do mundo e um sistemas de espelhos mais complexos já vistos.[1]

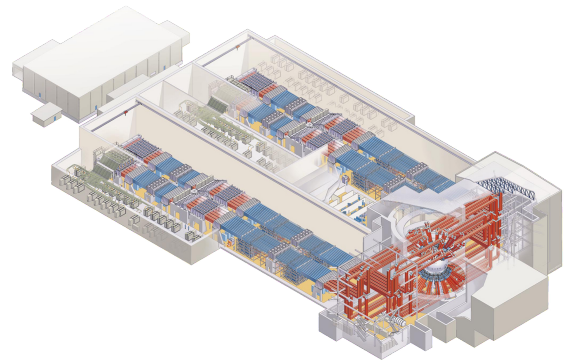


Figure 4. Modelo 3D do reator NIF

IV. CONCLUSÃO

O futuro da energia é quase certo, a humanidade usará mais energia a cada ano que se passar. As fontes de energias renováveis atuais, ainda que estejam em passos largos para se concretizarem como principais, possuem suas falhas e suas desvantagens que nos impedem de abandonar as energias não renováveis. Entretanto, a energia nuclear possui limitações que podem ser superadas com mais estudos e mais tempo de maturação, principalmente as de fusão nuclear. Assim, uma vez que dominarmos a fusão nuclear e otimizar nossos reatores para realizar fusão de maneira constante, poderemos obter uma fonte de energia que substituirá todas as outras e teremos um futuro apenas com energia limpa.

[1] N. J. de Carvalho Graça, INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA (2015).

[2] F. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, Vol. 3 (Springer, 2016).

[3] J. A. Bittencourt, *Fundamentals of PLASMA PHYSICS*, Vol. 4 (National Institute for Space Research – INPE, 2018).

- [4] R. Murray and K. Holbert, *Nuclear energy: An introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes*, Vol. 1 (Elsevier, 2019).
- [5] D. Whyte, *The royal Society* **377** (2019).
- [6] ITER, “What is iter?” <https://www.iter.org/proj/inafewlines> (2023).
- [7] G. Ronchi, Universidade de São Paulo Instituto de Física (2017).
- [8] T. K. et al, *IAEA Nuclear Fusion* **59** (2019).