

## ANÁLISE REVISIONAL DA FUSÃO NUCLEAR CONTROLADA

**MÁRCIO FERREIRA DOS SANTOS<sup>1</sup>; JOEL PAVAN<sup>2</sup>; MAGNO PINTO  
COLLARES<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Universidade Federal de Pelotas – marcioferreira072@gmail.com*

<sup>2</sup> *Universidade Federal de Pelotas – joel.pava@ufpel.edu.br*

<sup>3</sup>*Universidade Federal do Rio Grande – magnocollares@furg.br*

### 1. INTRODUÇÃO

O princípio básico das reações de fusão nuclear é a junção de dois núcleos leves, cujo resultado gera um núcleo mais pesado e uma grande quantidade de energia. Este mesmo funcionamento é empregado nos reatores de fusão, como nos tokamaks, cujas reações que se mostraram mais promissoras foram a de Deutério - Trítio, pois produzem energia em larga escala (SAKANAKA, 1984).

Em 1968 na conferência de Novosibirsk, foram apresentados resultados experimentais de tokamaks que se encontravam em operação no Instituto Kurchatov em Moscou. Tais máquinas foram desenvolvidas durante a década de 50, principalmente pelas pesquisas do físico Artimovich, de acordo com CALDAS; VANNUCCI (1985). Desde então, a construção de tokamaks se espalhou mundo a fora, levando a comunidade científica a produzir resultado mais eficazes e precisos.

O tokamak é um dispositivo de confinamento magnético que, embora não seja o único a confinar o plasma num campo magnético, tem se mostrado o mais promissor, como afirma MANSO; VARANDAS (2006), cujo funcionamento básico consiste de um campo magnético toroidal  $B_\phi$ , que é formado pela corrente que percorre as bobinas situadas ao redor do vaso, e um campo poloidal  $B_\theta$ , que se forma a partir da corrente de plasma, sendo o campo toroidal o mais importante (WESSON, 2004). A junção destes dois campos magnéticos resulta na formação de linhas de força magnética na forma helicoidal, sendo esta helicidade responsável pela estabilidade da corrente de plasma e confinamento das partículas (BOSCO, 1981). Esta corrente de plasma é formada por íons que se mantêm acelerados por um campo elétrico  $\vec{E}$ , formado da variação temporal do fluxo magnético  $\phi_M$ , provocado por uma corrente elétrica  $I$ , presente nas espiras centrais do toróide (FREIDBERG, 2007).

Apesar dos experimentos de 1968 terem desencadeado uma grande expectativa de se obter energia através da fusão, até hoje, ainda não há um reator de fusão nuclear em operação. Do ponto de vista energético, as reações produzidas no tokamak precisam exceder as perdas térmicas, ou seja, a quantidade de energia de entrada tem que ser menor do que a energia de saída. Esta condição impõe um limite inferior ao produto da densidade das partículas  $n$  pelo tempo de confinamento de energia  $\tau_E$ , dado pelo critério de Lawson, sendo  $n\tau_E > f(Q)$ , onde  $Q$  é a relação entre a potência de fusão que se produz e a potência de aquecimento exterior fornecida ao plasma (SPIEGELBERG, 1981).

Além do ponto de vista energético, há também algumas instabilidades que contribuem para o não funcionamento eficaz do reator, sendo as mais comuns: a instabilidade de dobra, que considera o plasma como um fluido ideal,  $\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = 0$ , causando uma deformação na coluna do plasma; a instabilidade de ruptura, que considera o plasma como um fluido resistivo,  $\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = n\vec{J}$ , na qual surgem ilhas magnéticas; e a instabilidade de disruptura, que é considerada

a mais perigosa, pois surge de uma queda súbita de corrente, ocasionando tanto a destruição do plasma quanto a do dispositivo.

Pórem, quando se trata de equilíbrio em tokamaks, dois aspectos básicos são levantados. Primeiro: existe o balanço interno entre a pressão do plasma e as forças devido ao campo magnético; segundo: a configuração e posição do plasma (WESSON, 2004).

O presente trabalho continua em desenvolvimento, sendo abordado apenas conceitos básicos voltados ao funcionamento do tokamak e a geração do plasma no dispositivo. Contudo, um caráter experimental será realizado no tokamak NOVA, situado na FURG.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho continua em processo, no qual há duas abordagens, a teórica e experimental. No que diz respeito a parte teórica, revisões bibliográficas estão sendo realizadas mediante a pesquisa. No decorrer do trabalho, foi estudado os conceitos básicos do plasma no que diz respeito a sua natureza, e logo em seguida uma abordagem mais direta voltado ao processo de formação de plasma no tokamak e seu funcionamento. Neste processo, livros e artigos foram e continuam sendo imprescindíveis, no qual, publicações mais recentes são lidas ao decorrer da pesquisa.

Na abordagem de equilíbrio em tokamaks, as equações da MHD são de grande importância para descrever o comportamento do plasma no dispositivo. A primeiro momento, foi considerado o plasma como um fluido ideal, sendo usada as seguinte equações:

Conservação do número de partículas (1)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Conservação do momento linear (2)

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \vec{J} \times B$$

Equação de transporte de energia (3)

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{p}{\rho^\gamma} \right) = 0$$

Lei de Ohm (4)

$$\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = 0$$

Equações de Maxwell (5)

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}; \quad \nabla \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Em uma análise com simetria axissimétrica, o plasma é descrito bidimensionalmente, no qual é usada a equação de Grad-Shafranov, que pode ser escrita como uma equação diferencial para a função de fluxo poloidal  $\psi$

$$R \frac{\partial}{\partial R} \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} = -\mu_0 R^2 \frac{dp}{d\psi} - \mu_0^2 \frac{1}{2} \frac{df^2}{d\psi} \quad (6)$$

onde  $R$  e  $Z$  representam as respectivas posições,  $p$  representa a pressão,  $f$  representa o produto de  $R$  com o campo toroidal  $B_\phi$ , e  $\psi$  a função de fluxo poloidal.

Na parte experimental, visitas ao Instituto de Física, Matemática e Estatística (IMEF) na Universidade Federal do Rio Grande (FURG) foram realizadas, ao qual encontra-se o tokamak NOVA, doado pela UNICAMP em 2016. Durante a primeira visita ao tokamak, alguns disparos foram realizados. Todavia, o tokamak encontra-se em estado de configuração, onde ainda não é possível se tirar dados, pois isto deve-se a um aparelho que ainda não encontra-se instalado.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira etapa, está sendo caracterizado apenas um estudo teórico, que a princípio, será implementado um modelo matemático para descrever um sistema de plasma sujeito ao confinamento magnético, onde será considerado o plasma como um fluido ideal, e posteriormente, podendo também se considerar o plasma resistivo. Além disso, um código numérico também será implementado para que se possa retirar resultados deste modelo matemático. Já do ponto de vista experimental, serão tomadas medidas experimentais no tokamak NOVA que tenham precisão neste modelo matemático.

### 4. CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho, apenas conceitos teóricos e algumas manipulações de equações foram obtidas. Contudo, espera-se que realizações mais apuradas sejam obtidas e que as medidas experimentais possam vir a ser uma constatação dos resultados teóricos.

### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of plasma physics**. New York: Springer Science and Business Media, 2013. 3 ed.

FREIDBERG, J. **Plasma Physics and Fusion Energy**. New York: Cambridge University Press, 2007.

WESSON, John. **Tokamaks**. Oxford: Clarendon Press, 2004.

MANSO, M. E.; VARANDAS, C. A. F. Fusão nuclear, uma opção energética para o futuro. **Gazeta da Física**, Lisboa, v.29, n.1 e 2, p.66-73, 2006.

VARANDAS, C. A. F. O ITER no caminho para a energia de Fusão Nuclear. **Gazeta da Física**, Lisboa, v.32, n.1, p.27-29, 2009.

SAKANAKA, Paulo Hiroshi. Fusão termonuclear controlada. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, Campinas, v.4, n.1 e 2, p.103-113, 1984.

DALTRINI, A. M.; Machihda, M.; Monteiro. M. J. R.; KAMINISHIKAWAHARA, C. O. Tokamak NOVA-UNICAMP recent results. **Brazilian Journal of Physics**, Campinas, v.32, n1, p.26-29, 2002.

SHIGUEOKA, Hisataki. **Efeito toroidal sobre a estabilidade de plasma por um campo magnético**. 1977. 75f. Tese (Mestrado em Ciências) – Curso de Pós-graduação em Física, Universidade Estadual de Campinas.

BOSCO, Edson Del. **Formação do Plasma no TBR**. 1981. 155f. Tese (Mestrado em Física) – Curso de Pós-graduação em Física, Universidade de São Paulo.

Kaminishikawahara, Celso Ossamu. **Determinação da temperatura e densidade eletrônica do plasma no tokamak NOVA-UNICAMP**. 2004, 88f. Dissertação (Mestrado em Física) – Curso de Pós-graduação em Física, Universidade Estadual de Campinas.