

# Evolução da largura das ilhas magnéticas sob a ação de ondas de cíclotron em plasmas termonucleares em Tokamaks



D. O. Berto<sup>1</sup>, L. F. Ziebell<sup>2</sup>

1 Física-Pesquisa básica, UFRGS  
2 Instituto de Física, UFRGS



## Introdução

-Tokamak consiste em um confinamento toroidal onde coexistem um campo magnético toroidal e outro poloidal gerado pela corrente que percorre o plasma. Tem-se como objetivo usar Tokamaks como um reator de fusão nuclear.

-Dentre outras instabilidades, ocorrem em Tokamaks, instabilidades modo *tearing*, que geram estruturas chamadas ilhas magnéticas, formadas a partir da ligação das linhas de campo.

- O aumento do tamanho dessas estruturas pode causar perda catastrófica do confinamento (*disruption*) e portanto destruição do plasma.

- O objetivo é usar ondas de cíclotron eletrônicas (EC) para gerar corrente e aquecimento na região das ilhas, e controlar essas instabilidades.

## Metodologia

-Usa-se um formalismo quase-linear, para estudar a evolução da distribuição eletrônica.

- A solução é feita em uma lâmina transversal do Tokamak, portanto em uma dimensão.

- A solução vem da resolução da Equação de Fokker-Planck de forma auto-consistente a partir de uma distribuição inicial.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{EC} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_C + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_T + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{EL}$$

-Sendo  $t$  o tempo, os termos do lado direito da equação representam o efeito sobre a função distribuição da ação das ondas cíclotron eletrônica (EC), das colisões (C), do transporte radial das partículas (T) e da perda de energia resultante do tempo de confinamento finito (EL).

-Para estudo da evolução das ilhas magnéticas, pode-se usar a equação de Rutherford:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\kappa_r}{\sigma \mu_0} (\Delta' + \Delta'_\beta + \Delta'_{CD})$$

Onde,  
 $\omega$  – largura das ilhas  
 $\kappa_r$  – é uma constante sem dimensão  
 $\sigma$  – condutividade do plasma

-Os termos são, da esquerda para direita: o termo estabilizador clássico, ligado à corrente de equilíbrio, o termo neoclássico e o termo relacionado ao efeito da corrente gerada pelas ondas. Este último é dado por:

$$\Delta_{CD} = 16 \frac{\Delta_{vac} I_{CD} a^2}{n s_q I_p (\Delta r)^2 \bar{\omega}} \eta_{CD}$$

$$\Delta_{vac} = \frac{-2m}{r_s} \text{ é o valor de } \Delta' \text{ no vácuo,}$$

$m$  e  $n$  são o número poloidal e toroidal,  $s_q$  é *shear* magnético na superfície ressonante  $r = r_s$  sendo  $q = m/n$ ,  $q_a$  é o fator de segurança na borda  $I_p$  é a corrente total no plasma e  $I_{CD}$  é a corrente gerada pelas ondas de cíclotron  $\Delta r$  é a largura do canal de corrente das ondas de cíclotron,  $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\Delta r}$  e  $\eta_{CD}$  é a eficiência de geração de corrente.

- O termo neoclássico não foi levado em conta nesses resultados.

## Solução Numérica

-Foram comparados resultados usando largura fixa  $w=5\text{cm}$  e variando a largura até atingir 40% da largura inicial.

-Tokamak: Raio maior  $R=165\text{cm}$ , raio menor  $r=50\text{cm}$

-Ilhas do modo 2/1 centradas na posição  $x = 22,4 \text{ cm}$

-Usada uma grade no espaço de  $151 \times 71 \times 81$  ( $u_{||}$ ,  $u_{\perp}$ ,  $x$ )

-Voltagem entre  $V=-0.1$  e  $-1 \text{ V}$

-Ondas de Cíclotron:  $f = 140\text{GHz}$  e Potência entre 1 e 3 MW

-Angulo de injeção :  $23^\circ$

-Temperatura do plasma: centro= $3 \text{ keV}$ , borda= $0.03 \text{ keV}$

- Densidade: centro =  $5 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ , borda =  $5 \times 10^{12} / \text{cm}^3$

-Campo Magnético no centro  $2,72 \text{ T}$

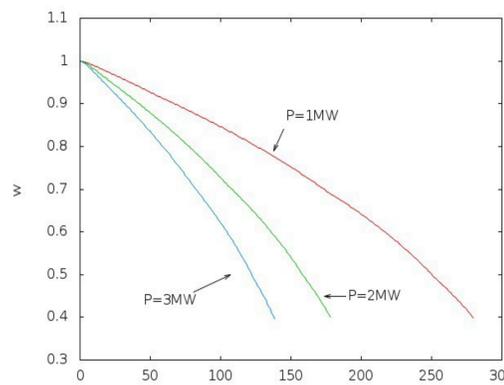


Fig 1

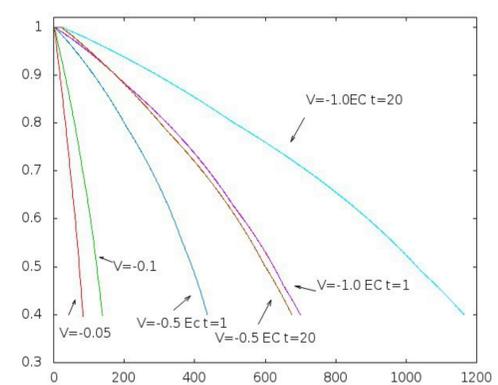


Fig 2.

Varição da largura da ilha com o tempo, para diferentes valores de potências de ondas EC injetadas (Fig 1) e para diferentes valores de voltagem no plasma (Fig 2). As ondas são injetadas em  $t=1$ . A Fig. 2 mostra também dois casos onde as ondas são injetadas em  $t=20$  (após a estabilização da corrente ohmica).

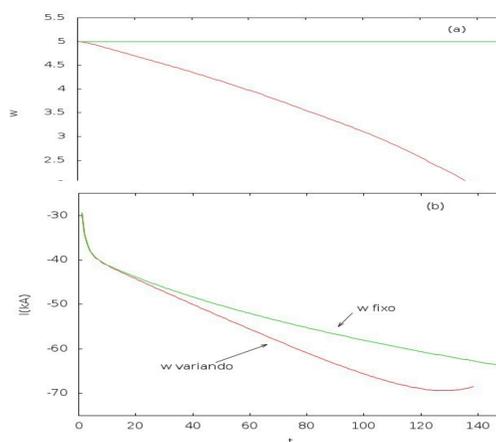


Fig 3

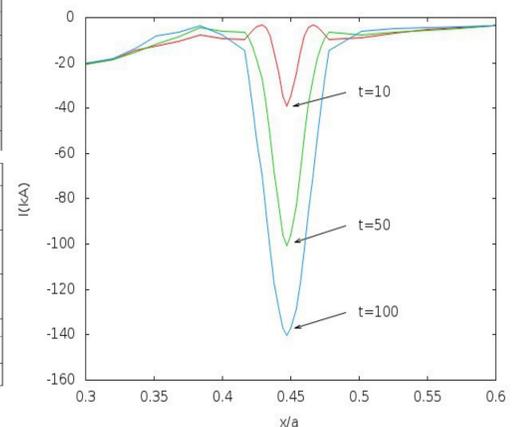


Fig 4

Para  $V=-0.1$ , e ondas injetadas em  $t=1$ . Fig.3: variação da largura das ilhas (a) e da corrente total no plasma (b) em função do tempo. Fig. 4. Perfil de densidade de corrente, para diferentes tempos.

## Resultados Finais

- Percebe-se que as ondas EC tem como efeito diminuir a largura das ilhas magnéticas, o que pode ajudar no controle da instabilidade.

-Quanto maior o valor da potência das ondas, maior o efeito,

-Quanto maior o valor da voltagem no plasma, menor o efeito.

-Com a diminuição da ilhas, a corrente gerada na região da ilha aumenta até atingir um máximo e depois volta a diminuir.