

AQUECIMENTO DO PLASMA NA RESSONÂNCIA HÍBRIDA INFERIOR NA MÁQUINA "LISA"

J.C.X.da Silva e C.da C.Rapozo

Instituto de Física - Universidade Federal Fluminense
24.020 - Niterói, RJ, Brasil

RESUMO:

Foi criado um plasma de Hélio com uma fonte de micro-onda na faixa de $f_{RF} = 2,45$ GHz e $P_{RF} = 800$ W e estudou-se a temperatura e densidade eletrônica, quando o plasma é excitado por rádio frequência de $f_{RF} = 30$ MHz e $P_{RF} = 0,1$ kW. Observou-se um ganho de aproximadamente 20% tanto na temperatura como na densidade e os modos predominantes TE_{12} e TM_{03} [1].

terna ω_{RF} é aproximadamente igual à frequência ciclotrônica dos elétrons ω_{ce} , ou seus harmônicos, a onda eletromagnética troca energia com o plasma através da ressonância com ω_{ce} , no caso em que a condição de ressonância $|\omega_{RF} - (l\omega_{ce}/KV_{Te})| \ll 1$ é satisfeita.

2.2 - Absorção Ressonante:

Neste trabalho concluímos que a absorção ressonante seja o maior mecanismo do plasma, devido ao fato de que a temperatura do plasma não é sensível ao campo magnético (plasma difuso)[4] e a componente do campo elétrico radial E_r tem valor predominante. A potência média absorvida por processo colisional de acordo com Appert[6] é dada por

$$P = \frac{v}{8\pi} L \int |E_r|^2 2\pi r dr \quad (2.1)$$

onde L e r são, respectivamente, comprimento e raio do plasma, E_r é a componente radial do campo elétrico e v a frequência de colisão.

Quando uma onda incide sobre uma camada de plasma, cuja densidade cresce na direção de propagação, para uma incidência normal, a onda penetrará até a profundidade de raio r_1 , onde

$$\omega_{RF} = \omega_{Pe}(r_1)$$

ou

$$\epsilon(r_1) = 1 - \frac{\omega_{Pe}^2(r_1)}{\omega_{RF}^2} = 0 \text{ (ressonância)} \quad (2.2)$$

2.3 - Ressonância Híbrida Inferior:

Em baixas frequências, o movimento de ions passa a ser importante, e a relação de dispersão para essas ondas, quando simplificada pela aproximação $\omega \ll \omega_{ce}$, de acordo com Krall[6], torna-se

$$n^2 = \frac{k^2 c^2}{\omega_{RF}^2} = - \frac{\omega_{ce}(\omega_{ci}^2 - \omega_{RF}^2)(\epsilon_1^2 - \epsilon_2^2)}{\omega_{UH}^2(\omega_{RF}^2 - \omega_{ce}\omega_{ci}) \frac{\omega_{Pe}^2 + \omega_{ce}\omega_{ci}}{\omega_{Pe}^2 + \omega_{ce}^2}} \quad (2.3)$$

1. INTRODUÇÃO:

A interação do plasma com a micro-onda na faixa de frequência ciclotrônica dos elétrons (ω_{ce}) e na faixa da frequência híbrida inferior (ω_{LH}), tem se mostrado importante para fins de aquecimento e geração de corrente não indutiva [2,3].

O objetivo deste trabalho é estudar a razão de aquecimento dos elétrons e a eficiência do sistema plasma-onda para uma pressão de 10^{-4} torr [1].

O experimento foi realizado na máquina linear "LISA", do tipo espelho magnético, cujo campo na região de interesse é de aproximadamente 900 Gauss.

Os parâmetros do plasma foram medidos com sonda de Langmuir, plana simples, sonda Hall, sonda eletrostática flutuante dupla, sonda magnética e espectrógrafo de prisma.

2. PARTE TEÓRICA:

2.1 - Absorção Ciclotrônica:

Uma das frequências naturais do plasma é a chamada ciclotrônica dos elétrons, que neste experimento compreende a faixa de alguns Giga-Hertz. Quando a frequência da fonte ex

onde ϵ_1 e ϵ_2 são as componentes do tensor dielétrico.

Este resultado mostra que o modo extraordinário aparece em baixas frequências, quando $\omega_{RF} \approx (\omega_{ce} \omega_{ci})^{1/2}$.

Para um dado aumento na densidade a rádio frequência a ser injetada no plasma deve ressonar com a frequência de plasma (ω_{pe}), e a ressonância aparece da relação dada por Raimbault et al.[2]

$$\omega_{pe}^2 = \frac{(\omega_{RF}^2 - \omega_{ce}^2)(\omega_{RF}^2 - \omega_{ci}^2)}{\omega_{RF}^2 - \omega_{ce} \omega_{ci}} \quad (2.4)$$

onde ω_p é o conjunto de frequências de plasma ($\omega_{pe} + \omega_{pi}$).

3. EXPERIMENTO:

A Fig.01 mostra o aparato experimental para a produção de um plasma de Hélio a uma pressão de aproximadamente 10^{-4} torr. O plasma é produzido por meio de ressonância ciclotrônica dos elétrons num nível de potência de 800 W numa frequência de $f_{RF} = 2,45$ GHz, para uma configuração de campo do tipo espelho.

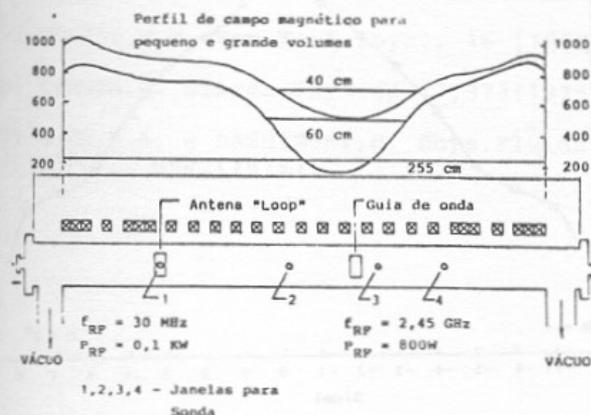


Fig.01 - Máquina "LISA".

Uma baixa frequência, na faixa de 30MHz e potência de 0,1 kW (rádio frequência), é injetada no plasma através de uma antena "loop" de 5 cm de raio por 5 cm de comprimento.

A antena "loop" consiste de uma única volta com o objetivo de excitar o plasma. Os campos da rádio frequência são medidos com sonda magnética e sonda eletrostática, flutuante, dupla, ambas com movimento na direção radial.

A temperatura dos elétrons foi medida por sonda de Langmuir e espectrógrafo de prisma.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE:

Apresentamos a seguir os perfis de temperatura e densidade em função do raio para duas situações diferentes:

a) plasma criado por micro-onda (sem excitação); e

b) plasma criado por micro-onda e excitado por rádio frequência.

Apresentamos também os perfis das componentes de campo elétrico E_r , E_θ , E_z para o estudo dos modos dominantes.

4.1 - Resultados Experimentais e Análise quando não existe a excitação:

Na Fig.02A observamos que junto à parede a temperatura decresce devido a perdas por difusão.

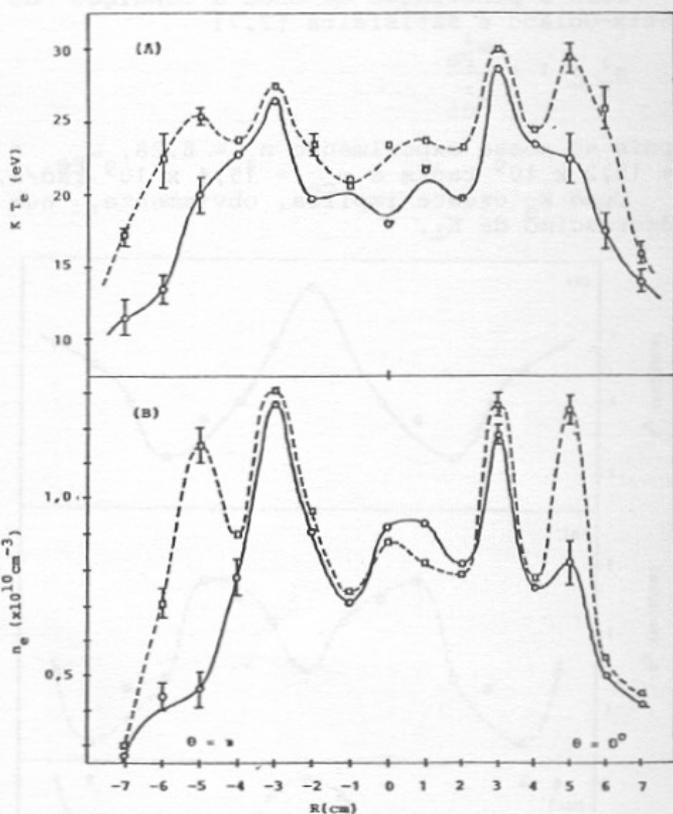


Fig.02 - Perfil radial da temperatura (A) e densidade (B) de elétrons. Sem RF (linha cheia), com RF (linha pontilhada).

O crescimento da temperatura dos elétrons é gradativa até atingir o ponto de coordenada da $r = -3$ cm, onde o valor do campo magnético B_0 possibilita o aquecimento via ressonância ciclotrônica dos elétrons. O aumento na densidade conduz à ressonância espacial de Langmuir, ou seja, em $r = -3$ cm temos $\omega_{MO} \approx \omega_{pe} \approx \omega_{ce}$, o mesmo acontecendo para $r = 3$ cm por causa da simetria da máquina. As temperaturas alcançam aproximadamente 26,5 eV e 28,8 eV, respectivamente.

Nestas regiões, além dos processos citados anteriormente, temos um aquecimento por absorção ressonante via E_r , cujos valores são predominantes (Fig.03A).

4.2 - Resultados Experimentais e Análise para o Plasma com Excitação:

Examinando as Figs.02A e 02B pode-se ver o aparecimento de mais dois picos de temperatura e densidade, além de um aquecimento médio superior a 20% ao longo de todo o perfil. Estes dois novos picos de temperatura em $r = + 5$ cm podem ser explicados, observando-se o perfil do campo (Fig.04). Verifica-se a existência de ressonância híbrida inferior, onde $\omega_{RF} \approx \omega_{LH}$, onde identificamos a camada híbrida inferior, através da medição de K_z .

Para a penetração da onda a condição de Stix-Goland é satisfeita [2,7]

$$n_z^2 \geq 1 + \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 c_i}$$

pois no nosso experimento $n_z \approx 6,28$, $\omega_{pe} \approx 15,2 \times 10^9$ rad/s e $\omega_{ce} = 75,4 \times 10^9$ rad/s.

Como K_z cresce implica, obviamente, num decréscimo de K_{\perp} .

leva a dizer que $E_{\theta} \sim J_1(Kr)$, o que está compatível com Kramer [8]. Se E_{θ} é proporcional a J_1 e o campo magnético não varia substancialmente no tempo, podemos tomar uma aproximação eletrostática [4,9] e escrever o potencial como:

$$\varphi = A J_1(Kr) e^{i(\omega t - n\theta - bz)}$$

e as componentes dos campos como:

$$E_{\theta} = A J_1(Kr)$$

$$E_r = B J_1'(Kr) e^{i(\omega t - n\theta - bz)}$$

$$E_z = C J_0(Kr)$$

Examinando o perfil dos campos, vemos que os modos dominantes são TE_{12} e TM_{03} . Isto se dá, pois o modo dominante TE_{10} se excita, primeiramente no guia cilíndrico e o modo TE_{11} e a interação deste modo com o plasma magnetizado produzem os modos TE_{12} e TM_{03} .

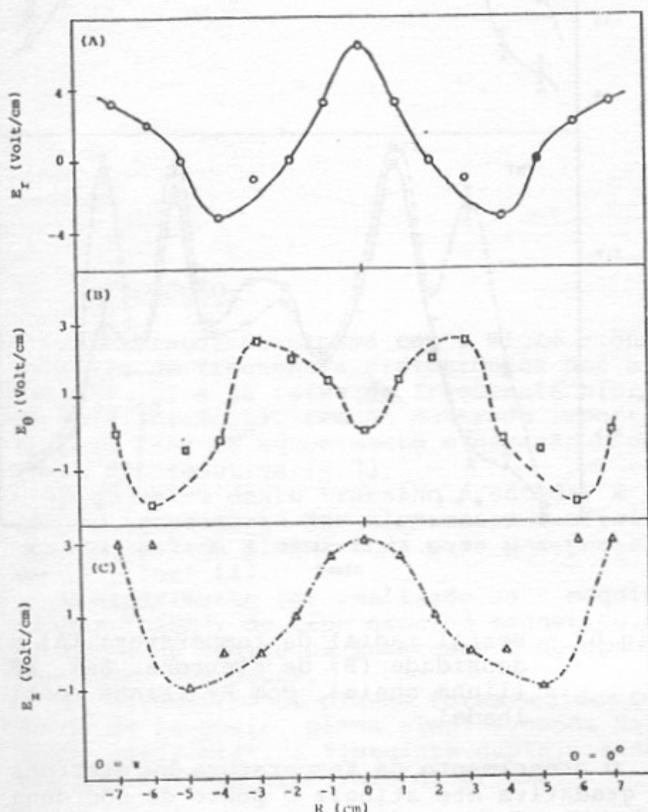


Fig.03-A,B,C - Componentes do campo elétrico, E_r , E_{θ} e E_z em função do raio.

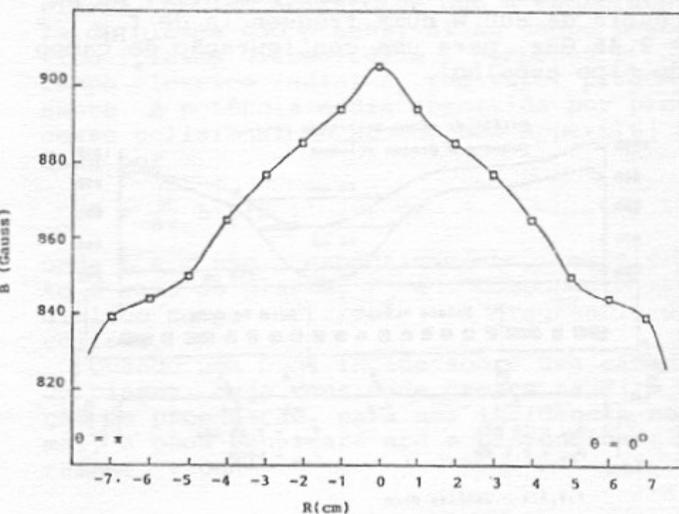


Fig.04 - Perfil radial do campo magnético ($z = 100$ cm).

5. CONCLUSÃO:

O ganho de temperatura e densidade mostram-se relevantes, para uma fonte excitada de baixa frequência e baixa potência, diminuindo o custo operacional.

Na observação dos campos elétricos, vemos a compatibilidade deste trabalho com os demais e que os modos predominantes são os TE_{12} e TM_{03} , o que confirma os dados de Kramer [8] e Rapozo [4].

Finalmente observamos os 3 processos de aquecimento, ressonância ciclotrônica, ressonância híbrida inferior e absorção ressonante, com um acréscimo de temperatura e densidade eletrônica caracterizado pelos pontos de coordenadas $r = + 3$ cm e $r = + 5$ cm, onde neste último houve um crescimento de K_z confirmando a existência de uma camada híbrida, compatível com trabalhos anteriores.

4.3 - Modos Predominantes:

As Figs.03A, 03B e 03C são os perfis das componentes de campo elétrico E_r , E_{θ} e E_z . Segundo estes dados experimentais, E_{θ} é zero no centro e na casca, tendo como raiz os valores 3,9 e 7,0 que, por comparação, nos

Agradecimentos:

Este trabalho foi financiado por FINEP, CAPES, CNPq e CNEN.

Os autores são gratos ao Engenheiro H. Teixeira e ao aluno J.J.G.Borges por suas colaborações a este trabalho.

Referências:

- [1] SILVA, José Carlos Xavier - Tese de Mestrado - UFF - 1987.
- [2] RAIMBAULT, P.A. e SHOHET, J.L. Plasma Physics 17, 327 (1975).
- [3] LUCKHARDT, S.C. Phys.Rev.Letters 48, 152 (1982).
- [4] RAPOZO, C.da C. Tese de Doutorado - UNICAMP (1985).
- [5] APPERT, K.; VACLAVIK, J.; VILLARD, L. An Introduction to the Theory of Alfvén Wave Heating, pag.15 (1984).
- [6] KRALL e TRIVELPIECE . Principles of Plasma Physics, McGraw-Hill, Kokakusha.
- [7] GOLAND, V.E. Sov.Tech.Phys., 16 (1980).
- [8] KRAMER, M. Plasma Physics 17, 373 (1975).
- [9] GORE, R.A. e LASHINSKY, H. Phys.Fluids 22(11), nov.(1979).