

Diagnósticos por Espectroscopia Ótica no Dispositivo CECI

F. Prado*; M. Ueda; Y. Aso
 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
 - INPE - C.P. 515
 12201 - São José dos Campos, SP
 Aluno de Mestrado* ITA/CNPq

Resumo

Realizaram-se diagnósticos óticos para determinação de parâmetros importantes do plasma gerado em um pequeno dispositivo de confinamento magnético, CECI, de configuração "Reversed Field Pinch (RFP)". A temperatura eletrônica foi medida pelo método da razão das intensidades das linhas espectrais do HeI e realizou-se um estudo da limpeza da câmara de plasma por descargas através da espectroscopia ótica.

O dispositivo CECI foi construído com a finalidade de estudar o processo de formação e manutenção da configuração RFP e particularmente na fase experimental aqui discutida, foi realizada a determinação de alguns parâmetros básicos da máquina, tais como: temperatura eletrônica; Z efetivo (carga iônica), F (região de inversão de campo), θ (parâmetro "pinch" de plasma). Concomitantemente, foi feito o estudo da limpeza da câmara por descargas à medida que se busca a otimização do dispositivo e do próprio plasma.

1 Introdução

Neste trabalho são discutidos resultados experimentais obtidos através de diagnósticos por espectroscopia ótica realizados em um pequeno dispositivo toroidal de confinamento de plasma CECI [1], com configuração "Reversed Field Pinch (RFP)" [2]. Dispositivo de confinamento do tipo RFP tem sido considerado um dos sistemas alternativos (frente aos TOKAMAKS) mais promissor para ser reator de fusão nuclear, uma vez que apresenta boa estabilidade do plasma com baixo campo de confinamento e a possibilidade de operação com alto β (10 - 30%). Nesse sistema, o plasma é confinado por combinação de campo magnético poloidal B_θ , gerado por corrente toroidal e campo magnético toroidal B_ϕ , gerado por bobinas externas, apresentando as seguintes características: os campos magnéticos poloidal e toroidal são de mesma ordem; $q < 1$; campo toroidal se inverte na região externa do plasma em relação à sua direção no eixo, devido à tendência em atingir um estado relaxado de configuração de mínima energia [3].

2 Dispositivo CECI

As características principais do dispositivo CECI, mostrado esquematicamente na Fig. 1, são atualmente: raio maior (R) de 12 cm; raio menor (a) de 4,2 cm; 18 bobinas toroidais (com 4 voltas cada) refrigeradas à água para gerar campo magnético toroidal DC de até 360 Gauss; bobina poloidal com 80 voltas que é pulsada usando banco de capacitores de 16,85 μF (operado tipicamente a 5 kV); bobinas vertical pulsada usando banco de capacitores de 8,5 μF (operado a 4 kV) para evitar colisão rápida do plasma com a parede devido força de "hoop"; bobina de compensação para evitar campos espúrios no interior da casca de cobre; casca de cobre de 2 mm de espessura envolvendo um vaso toroidal de pirex para controle de instabilidade; pressão de base obtida com bomba difusora acoplada a uma bomba mecânica de 1×10^{-5} Torr; pressão de trabalho, usando-se gás hélio que é, tipicamente, em condições otimizadas, de 2×10^{-5} Torr; descarga iniciada com canhão de elétrons por emissão termoiônica, com filamento de tungstênio a 2500 K e tensão catodo-anodo de 100 V e preionização, utilizando a mesma bobina poloidal com capacitores de 0,25 μF (operados a 8 kV).

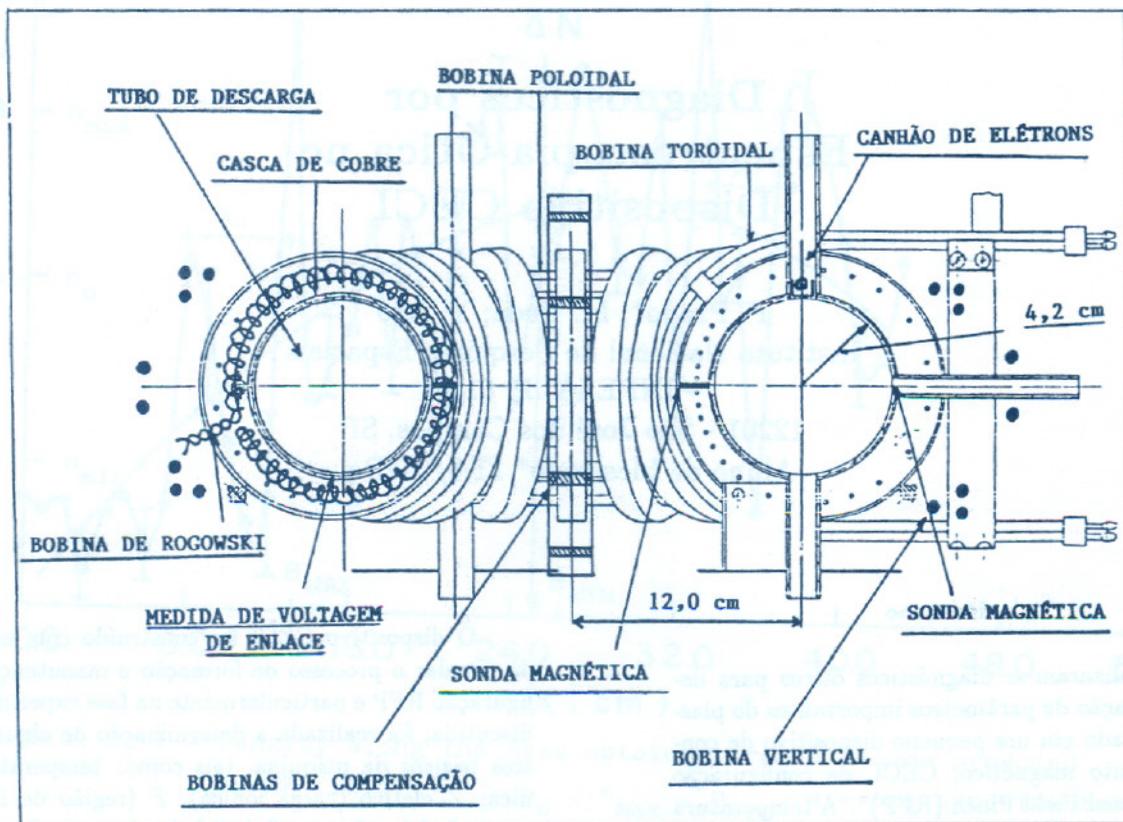


Figura 1. Desenho esquemático do dispositivo CECI

3 Montagem Experimental do Diagnóstico por Espectroscopia ótica

O sistema montado para realizar os diagnósticos por espectroscopia ótica, mostrado na Fig. 2, consiste em dois espectrômetros-monocromadores, modelo H-20 da marca Jobin Yvon de incidência normal e resolução experimental de 30Å para fendas de abertura de 0,5 mm. Os monocromadores estão dispostos perpendicularmente e acoplados a duas fotomultiplicadoras, modelo R 1246 da marca Hamamatsu com sensibilidade de 3000 a 6500 Åe pico em 4200 Å.

O banco ótico usado na focagem da luz de plasma nas fendas de entrada dos espectrômetros é constituído por uma lente convergente da Oriel de distância focal de 250 mm; um espelho semi-refletor para divisão do feixe de luz e duas lentes convergentes de distância focal de 200 mm.

A calibração relativa dos dois conjuntos espectrômetro-fotomultiplicadora em toda região de sensibilidade útil foi efetuada usando-se lâmpada padrão de irradiância espectral, modelo ES8315 da Eppley.

Cabe, ainda, ressaltar que, além do sistema acima descrito, para diagnósticos por espectroscopia ótica, outros diagnósticos básicos já foram adequados para o dispositivo CECI, tais como: bobinas de Rogowski para medida de corrente de plasma; sondas magnéticas calibradas para medida de campos magnéticos e sonda direcional para medir fluxo de plasma.

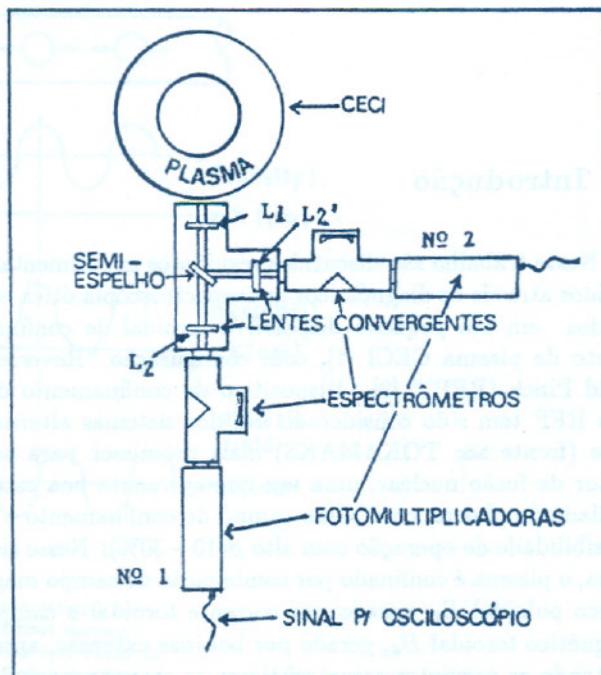


Figura 2. Montagem experimental para diagnósticos por espectroscopia ótica

4 Medida de Temperatura Eletrônica

A temperatura eletrônica foi obtida pelo método da razão das intensidades das linhas espectrais do HeI, 4713 Å e 4921 Å [4], cuja validade é garantida pelas condições de operação do CECI ($n_e \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ e $T_e < 100 \text{ eV}$). As duas linhas em questão foram medidas simultaneamente para se evitar possíveis erros da medida devido a não reprodutibilidade na produção do plasma.

Nas condições otimizadas descritas acima quando descrevemos as características do CECI e campo toroidal médio de 60 Gauss, foi medida temperatura eletrônica variando na faixa de 40 – 50 eV durante o pulso. A descarga apresentou duração de aproximadamente 180 μs e corrente de plasma da ordem de 1 kA. O perfil dos sinais das linhas de He em questão, o perfil temporal da temperatura eletrônica e a corrente de plasma são mostrados nas Figs. 3, 4 e 5, respectivamente.

Conhecendo-se o valor da temperatura eletrônica, foi possível obter-se o valor de Z efetivo pelo método da condutividade de Spitzer. O valor encontrado foi bastante alto, na faixa de 100, o que indica que o modelo de Spitzer é inadequado para o plasma produzido no CECI. Este resultado será comparado com a medida de Z efetivo pelo método da medida da radiação "Bremsstrahlung" [5].

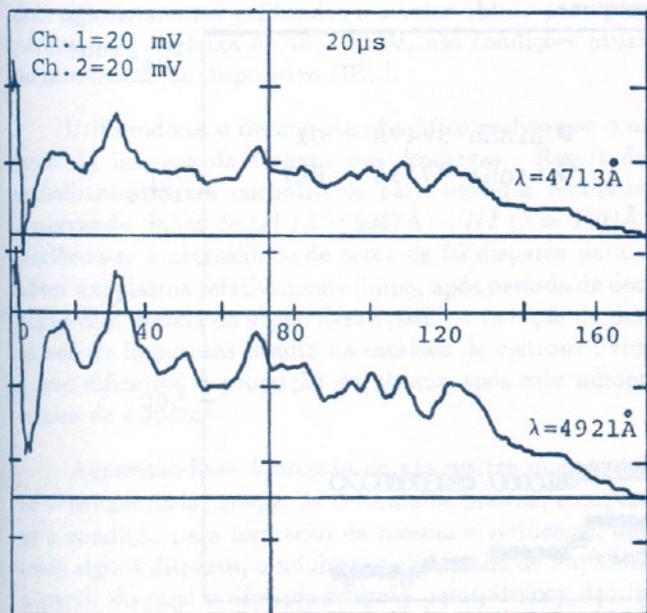


Figura 3. Perfil das intensidades das linhas de HeI, $\lambda = 4713 \text{ Å}$ e $\lambda = 4921 \text{ Å}$

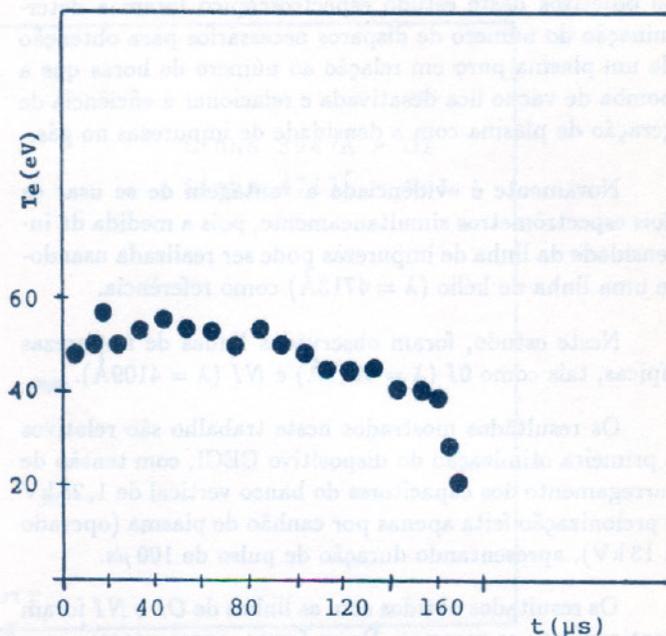


Figura 4. Perfil temporal da temperatura eletrônica obtida pelo método da razão das intensidades das linhas de HeI

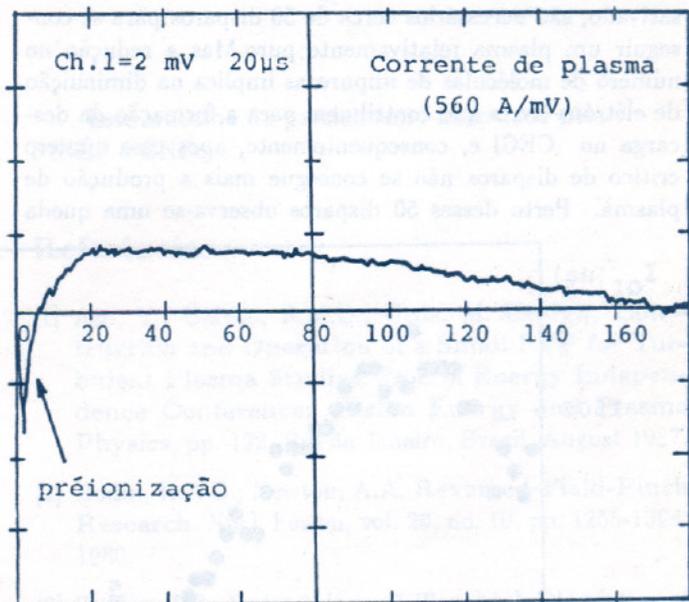


Figura 5. Perfil temporal da corrente de plasma gerado no dispositivo CECI

5 Estudo da Limpeza da Câmara de Vácuo do CECI por Descargas

A limpeza de impurezas por descargas no CECI se faz por sucessivas colisões do plasma com as paredes do vaso de pìrex à medida que os disparos vão sendo realizados e

os objetivos deste estudo espectroscópico foram a determinação do número de disparos necessários para obtenção de um plasma puro em relação ao número de horas que a bomba de vácuo fica desativada e relacionar a eficiência de geração de plasma com a densidade de impurezas no gás.

Novamente é evidenciada a vantagem de se usar os dois espectrômetros simultaneamente, pois a medida da intensidade da linha de impurezas pode ser realizada usando-se uma linha de hélio ($\lambda = 4713\text{\AA}$) como referência.

Neste estudo, foram observadas linhas de impurezas típicas, tais como *OI* ($\lambda = 3947\text{\AA}$) e *NI* ($\lambda = 4109\text{\AA}$).

Os resultados mostrados neste trabalho são relativos à primeira otimização do dispositivo CECI, com tensão de carregamento dos capacitores do banco vertical de 1,25 kV e preionização feita apenas por canhão de plasma (operado a 13 kV), apresentando duração de pulso de 100 μs .

Os resultados obtidos com as linhas de *OI* e *NI* foram praticamente os mesmos. Dessa forma, apresentamos apenas o estudo realizado com a linha $\lambda = 3947\text{\AA}$ *OI*. Observando-se a Fig. 6, que nos mostra as intensidades das linhas do oxigênio e hélio em relação ao número de disparos, pode-se verificar que, após um período de doze horas sem descargas no dispositivo e sistema de vácuo desativado, são necessários cerca de 50 disparos para se conseguir um plasma relativamente puro. Mas a redução no número de moléculas de impurezas implica na diminuição de elétrons livres que contribuem para a formação da descarga no CECI e, conseqüentemente, após esse número crítico de disparos não se consegue mais a produção de plasma. Perto desses 50 disparos observa-se uma queda

de aproximadamente 30% na intensidade da linha de *OI* relativa à linha de *HeI* usada como referência, quando se trabalha com pressão de $1,5 \times 10^{-5}$ Torr.

Aumentando-se a pressão de gás *He* para $2,0 \times 10^{-5}$ Torr, possibilita-se a elevação da densidade eletrônica e mesmo com baixa densidade de oxigênio ou nitrogênio, recupera-se a condição para formação do plasma. Com alguns disparos adicionais, a intensidade da linha de impureza torna-se constante, evidenciando o mínimo de impurezas que se pode obter com a limpeza por descargas no nosso dispositivo.

Analisando-se a Fig.7, que nos relaciona a intensidade da linha de *OI* relativa à linha de *HeI* com o número de disparos após três horas sem descargas no dispositivo, observa-se um aumento de cerca de 40% na intensidade relativa da linha de impureza. Mais 20 disparos são necessários para se conseguir novamente a limpeza máxima do plasma por descargas.

Finalmente, este método de medida para estudo de impurezas deve ser repetido nas atuais condições de otimização da máquina, uma vez que o aumento do tempo de duração do pulso obtido experimentalmente, deve refletir em uma limpeza por descargas mais eficiente.

6 Conclusões

Neste trabalho foram apresentados resultados obtidos em diagnósticos por espectroscopia ótica aplicados no dispositivo CECI usados para caracterizar o plasma e, assim, atingir-se as condições ótimas de funcionamento da máquina.

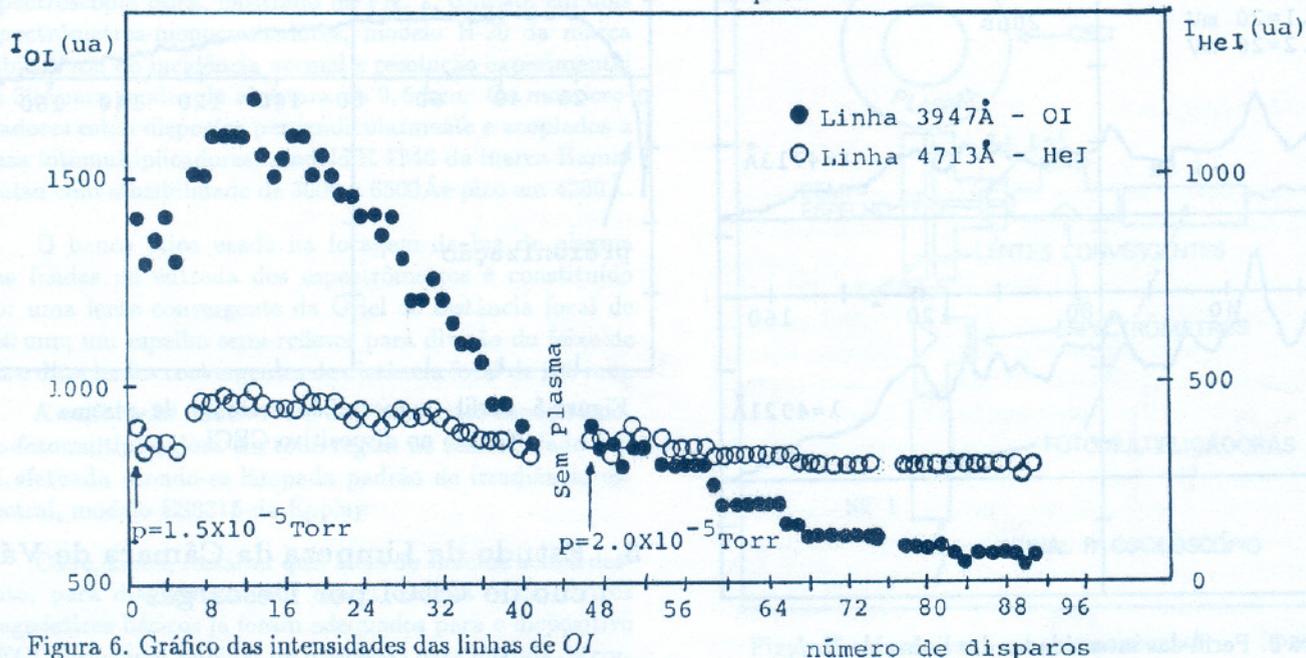


Figura 6. Gráfico das intensidades das linhas de *OI* e *HeI* versus número de disparos após um período de 12 horas com sistema de vácuo do CECI desativado

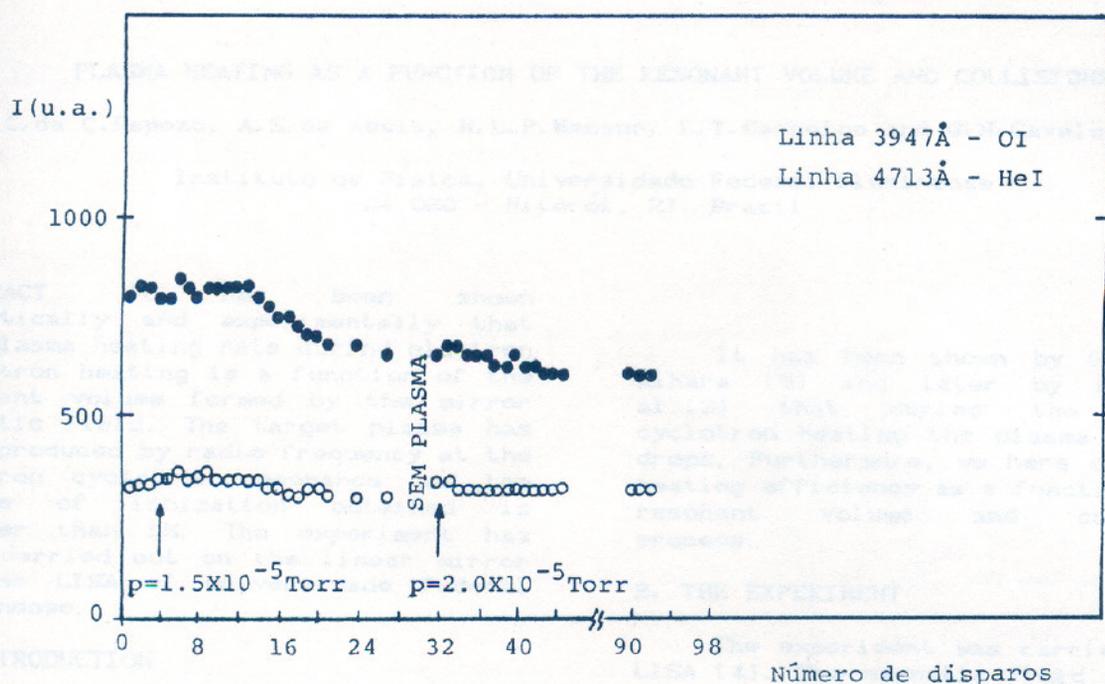


Figura 7. Gráfico das intensidades das linhas de OI e HeI versus número de disparos após um período de três horas sem descargas no dispositivo CECI

A temperatura eletrônica foi medida pelo método da razão das intensidades das linhas espectrais, $\lambda = 4713\text{\AA}$ e $\lambda = 4921\text{\AA}$, do HeI, ambas medidas simultaneamente com dois espectrômetros calibrados e o valor obtido para temperatura foi da faixa de 40 – 50 eV, nas condições atuais de otimização do dispositivo CECI.

Utilizando-se o mesmo sistema ótico realizou-se o estudo da limpeza da câmara por descargas. Resultados semelhantes foram encontrados para medidas realizadas observando linhas de OI ($\lambda = 3947\text{\AA}$) e NI ($\lambda = 4109\text{\AA}$). Verificou-se a necessidade de cerca de 50 disparos para se obter um plasma relativamente limpo, após período de doze horas com bomba de vácuo desativada. A redução da densidade de impurezas resulta na escassez de elétrons livres, o que dificultou a produção de plasma após este número crítico de disparos.

Aumentando-se a pressão de gás neutro quando não se consegue mais geração da corrente de plasma, recupera-se a condição para formação da mesma e verifica-se, após mais alguns disparos, o mínimo de densidade de impurezas a partir do qual o nível de emissão pelos átomos das impurezas fica constante.

A eficiência da limpeza da câmara por descargas foi evidenciada pela queda de 30% na intensidade da linha de OI relativa à linha de HeI que foi observada após 50 disparos.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FINEP e CNPq.

Referências

- [1] Aso, Y.; Galvão, R.M.O.; Ueda, M. Design, Construction and Operation of a Small RFP for Turbulent Plasma Studies. Proc. of Energy Independence Conference: Fusion Energy and Plasma Physics, pp. 122, Rio de Janeiro, Brazil, August 1987.
- [2] Bodin, H.A.B.; Newton, A.A. Reversed-Field-Pinch Research. Nucl. Fusion, vol. 20, no. 10, pp. 1255-1324, 1980.
- [3] Taylor, J.B. Relaxation of Toroidal Plasma and Generation of Reverse Magnetic Field. Phys. Rev. Lett., vol. 33, no. 19, pp. 1139-1141, Nov. 1974.
- [4] McWhirter, R.W.P. Plasma Diagnostic Technique, pp. 201, Chapter 5, Edited by R.H. Hudlestone and S.L. Leonardo, Academic Press, New York, San Francisco and London, 1965.
- [5] Kadotra, K. et al. Space and Time-Resolved Study of Impurities by Visible Spectroscopy in the High-Density Regime of JIPPT-II TOKAMAK Plasma. Nucl Fusion, vol. 20, no. 2, pp. 209-212, 1980.