

BR 9331208



PRESIDENCIA DA REPUBLICA
SECRETARIA DA CIENCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5414-RPQ/661

**DIAGNÓSTICO DE PLASMA DO
DISPOSITIVO CECI POR
ESPECTROSCOPIA ÓTICA**

**Mário Ueda
Milton E. Kayama
Yoshiyuki Aso**

**INPE
São José dos Campos
Novembro de 1991**

Publicado por:

Divisão de Ensino e Documentação - DED

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Caixa Postal 515

12201 - São José dos Campos - SP - Brasil

Telex: 123.3530 INPE BR

Fone: (0123) 41.8977 - Ramal 324

Fax: 0123-21-8743

- Solicita-se intercâmbio
- We ask for exchange
- Si sollecita intercambio
- On demande l'échange
- Mann bittet un Austausch
- Pidese canje
- Просим обмена
- 歡迎著作交換
- 出使物交換の不振

Publicação Externa - É permitida sua reprodução para interessados.

INPE-5414-RPQ/661

**DIAGNÓSTICO DE PLASMA DO
DISPOSITIVO CECI POR
ESPECTROSCOPIA ÓTICA**

**Mário Ueda
Milton E. Kayama
Yoshiyuki Aso**

**INPE
São José dos Campos
Novembro de 1991**

**SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-5414-RPQ/661

**DIAGNÓSTICO DE PLASMA DO
DISPOSITIVO CECI POR
ESPECTROSCOPIA ÓTICA**

**Mário Ueda
Milton E. Kayama
Yoshiyuki Aso**

**INPE
São José dos Campos
Novembro de 1991**

533.9

UEDA, M. et al.

Diagnóstico de plasma do dispositivo
CECI por espectroscopia ótica. / M.
Ueda; M. E. Kayama; Y. Aso. -- São José
dos Campos: INPE, 1991. 74p. -- (INPE-
5414-RPQ/661)

1. Plasma. 2. Espectroscopia ótica.
I. Título.

AGRADECIMENTOS

**À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo)
pelo financiamento deste experimento.**

**Ao Dr. Hisao Takahashi pelo empréstimo das fontes de luz para o
alinhamento do espectrômetro.**

RESUMO

Descreve-se a aplicação de um espectrômetro que é operado na região do visível, para o diagnóstico de um plasma gerado num dispositivo de confinamento magnético com uma configuração RFP, denominado CECI. O espectrômetro, de modelo HR-640S, da marca Jobin Yvon, provido de uma fotomultiplicadora, foi utilizado para realizar a medida do alargamento Doppler das linhas de emissão, o que permitiu a determinação da temperatura iônica no CECI que foi da ordem de 2 – 3 eV. A temperatura eletrônica de 40 – 50 eV foi determinada pelo método de razão das intensidades das linhas de *He I*. A temperatura iônica obtida espectroscopicamente está em melhor concordância com a temperatura eletrônica de 10 eV, obtida com uma sonda eletrostática. As emissões de linhas de *He II*, *HI*, *C II* e *O II* foram comparadas com sinais de outros diagnósticos eletromagnéticos e estudadas as correlações, o que indicou a presença de instabilidades MHD no plasma observado.

PLASMA DIAGNOSTICS IN THE CECI DEVICE THROUGH VISIBLE SPECTROSCOPY

ABSTRACT

In this paper we discuss the application of a visible spectrometer which was used to diagnose a plasma produced in an RFP device, called CECI. A Jobin Yvon, HR-640S spectrometer with a photomultiplier detector was used to measure the Doppler broadening of lines emitted by the plasma, and allowed to measure the ion temperatures of the order of 2–3 eV. The electron temperature of 40–50 eV was determined by the method of *HeI* line intensity ratio. The spectroscopically determined ion temperature is in better accordance with the 10 eV electron temperature obtained with an electrostatic probe. The line emissions of *HeII*, *HI*, *CII* and *OII* were compared with signals from other diagnostics, and their correlations indicated the presence of MHD instabilities in the plasma.

SUMÁRIO

	Pag.
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 DISPOSITIVO CECI	5
CAPÍTULO 3 DESCRIÇÃO DO ESPECTRÔMETRO COM DETE- ÇÃO POR FOTOMULTIPLICADORA	8
CAPÍTULO 4 ALINHAMENTO DOS COMPONENTES ÓTICOS DO ESPECTRÔMETRO E RESOLUÇÃO ESPECTRAL OBTIDA	13
CAPÍTULO 5 MONTAGEM EXPERIMENTAL DO DIAGNÓSTICO ÓTICO PARA MEDIDAS DE PARÂMETROS DE PLASMA DO CECI	20
CAPÍTULO 6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	24
6.1 MEDIDA DA TEMPERATURA IÔNICA NO CECI PELO ALARGA- MENTO DOPPLER DE LINHA DE EMISSÃO	24
6.2 MEDIDA DA TEMPERATURA DOS ELÉTRONS NO CECI	35
6.3 MEDIDAS DE IMPUREZAS NO PLASMA	38
6.4 MEDIDAS DE INTENSIDADE DA LINHA DE <i>HeII</i>	40
6.5 ESTUDO DA CORRELAÇÃO DOS SINAIS DE EMISSÃO DE LINHA DE <i>HeII</i> , DA DENSIDADE DE PLASMA NA BORDA $n_e(b)$, DO CAM- PO TORO	41
CAPÍTULO 7 DISCUSSÃO	55
CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
APÊNDICE A ANÁLISE DE DADOS	60
A.1 Digitalização	60
A.2 Processamento dos sinais de medida	63

LISTA DE FIGURAS

	Pag.	
1.1	Perfis radiais do campo toroidal B_ϕ e campo toloidal B_θ n.º in RFP, baseado no Modelo de Função de Bessel	2
1.2	Diagrama $F - \Theta$. A curva sólida indica o "locus" do estado de mínima energia baseado no Modelo de Função de Bessel	3
2.1	Desenho esquemático do dispositivo CECI com alguns diagnósticos básicos utilizados.	6
2.2	Perfil temporal da corrente de plasma gerado no dispositivo CECI.	7
3.1	Desenho em escala do espectrômetro HR-640S.	9
3.2	Circuito para alimentação da fotomultiplicadora IP28.	10
3.3	Eficiência da rede de difração utilizada no espectrômetro.	11
3.4	Resposta espectral da fotomultiplicadora IP28 da RCA (curva S5).	12
4.1	Montagem ótica para ajustes dos componentes do espectrômetro.	14
4.2	Montagem experimental para determinação da resolução do espectrômetro.	15
4.3	FWHM de uma linha de Hg versus abertura da fenda. Alinhamento preliminar.	16
4.4	FWHM de uma linha de Hg versus abertura das fendas para diferentes condições de iluminação do espectrômetro.	17
4.5	Efeito da altura da fenda na resolução do espectrômetro. (Abertura da fenda 30 mm).	18
4.6	Erro na leitura de λ	19
5.1	Montagem experimental do diagnóstico espectroscópico no CECI.	21
5.2	Fotografia da montagem experimental do espectrômetro no CECI.	22
5.3	Detalhe da parte ótica do experimento.	23
6.1	Intensidade da emissão da linha HI 4861,3 Å. Canal 1: corrente de plasma. Canal 2: perfil temporal de HI 4861,3 Å.	25
6.2	Intensidade da emissão da linha HeI 5015,7 Å. Canal 1: corrente de plasma. Canal 2: perfil temporal de HeI 5015,7 Å.	26
6.3	Intensidade da emissão da linha HeI 3888,6 Å. Canal 1: corrente de plasma. Canal 2: perfil temporal de HeI 3888,6 Å.	27
6.4	Alargamento Doppler da linha HI 4861,3 Å.	29
6.5	Alargamento Doppler da linha HeI 5015,7 Å.	30
6.6	Alargamento Doppler da linha HeI 3888,6 Å.	31
6.7	Alargamento Doppler da linha 4861,3 Å (em $t = 120 \mu s$) para descarga com corrente de plasma mostrada na Figura 6.8	32
6.8	Perfil temporal típico da corrente de plasma das descargas para os quais foi determinado o perfil temporal da temperatura iônica.	33
6.9	Perfil temporal da temperatura iônica no CECI.	34
6.10	Gráfico da razão das intensidades de linhas 4713 Å e 4921 Å HeI versus temperatura eletrônica do plasma.	35

6.11	Perfil temporal da emissão da linha 4713 Å <i>HeI</i> junto com a corrente de plasma (acima).	36
6.12	Perfil temporal da emissão da linha 4921 Å <i>HeI</i> junto com a corrente de plasma (acima).	37
6.13	Perfil temporal da temperatura eletrônica no CECI usando o método da razão das linhas de <i>HeI</i>	43
6.14	Gráfico das intensidades das linhas de <i>OI</i> e <i>HeI</i> versus número de disparos.	44
6.15	Intensidade da emissão da linha <i>HI</i> 4861,3 Å. Canal 1: corrente de plasma. Canal 2: perfil temporal de <i>HI</i> 4861,3 Å.	45
6.16	Abaixo: perfil temporal da emissão da linha 4267 Å <i>CII</i> numa descarga padrão. Acima: sinal de sonda eletrostática.	46
6.17	Abaixo: perfil temporal da emissão da linha 4267 Å <i>CII</i> numa descarga com $B_p = 120$ G. Acima: sinal da sonda eletrostática.	47
6.18	Intensidade da emissão da linha <i>HeII</i> 4686 Å. Canal 1: corrente de plasma. Canal 2: perfil temporal de <i>HeII</i> 4686 Å.	48
6.19	Intensidade da emissão da linha <i>HeII</i> 4686 Å. Canal 1: corrente de plasma. Canal 2: perfil temporal de <i>HeII</i> 4686 Å.	49
6.20	Correlação de sinais para descarga padrão. Perfil da corrente de plasma.	50
6.21	Correlação de sinais. Canal 1: sinal da sonda eletrostática. Canal 2: sinal da emissão de <i>HeII</i>	51
6.22	Correlação de sinais. Canal 1: sinal de $B_p(1)$. Canal 2: sinal de $B_p(a)$.	51
6.23	Correlação de sinais, caso sem preionização. Perfil da corrente de plasma.	52
6.24	Correlação de sinais. Canal 1: sinal da sonda eletrostática. Canal 2: sinal da emissão de <i>HeII</i>	53
6.25	Correlação de sinais. Canal 1: sinal de $B_p(a)$. Canal 2: sinal de $B_p(a)$.	54
7.1	Gráfico da temperatura do plasma versus densidade do plasma.	57
A.1	Diagrama de blocos do programa de digitalização.	63
A.2	Diagrama de blocos para processamento de dados.	66
A.3	Perfis dos sinais de emissão da linha 4861 Å <i>HI</i> digitalizados.	67

LISTA DE TABELAS

Pag.

A.1 Características da mesa digitalizadora 61

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No Laboratório Associado de Plasmas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, está sendo operado com sucesso uma máquina de confinamento magnético de plasma, baseada no princípio de configuração de estrição a campo inverso ("Reversed Field Pinch" - RFP), denominada CECI.¹ A configuração RFP, assim como a configuração Tokamak, é um membro da classe de configurações de confinamento magnético com simetria axial, nas quais a coluna de plasma é confinada por uma combinação de um campo magnético poloidal (B_θ), produzido por uma corrente toroidal que flui no plasma, e um campo toroidal (B_ϕ), produzido por bobinas externas. A diferença entre o Tokamak e o RFP está na topologia do campo magnético, ou seja, na variação de B_θ e B_ϕ com a posição radial na coluna de plasma. As duas características essenciais do RFP são:

- 1) as componentes poloidal e toroidal do campo magnético são da mesma magnitude, isto é, $B_\theta \sim |B_\phi|$. Isto significa que o fator de segurança $q = a|B_\phi|/R(B_\theta) \ll 1$, enquanto para os Tokamaks $q > 1$. Aqui a e R são, respectivamente, os raios menor e maior da coluna de plasma;
- 2) a componente toroidal do campo magnético tem sentido inverso na periferia da coluna de plasma com relação ao sentido no eixo magnético. Na Figura 1.1 são mostrados os perfis radiais das componentes poloidal e toroidal do campo magnético de uma configuração RFP.

O comportamento de uma descarga RFP é geralmente representado num diagrama (F, Θ), onde $F = B_\theta(a)/\langle B_\theta \rangle$ e $\Theta = B_\phi(a)/\langle B_\phi \rangle$ como o mostrado na Figura 1.2. A configuração RFP corresponde a um estado de energia mínima e à região hachuriada no gráfico.

As principais vantagens de um dispositivo RFP são: alto β (10-30%), baixo campo magnético de confinamento e possibilidade de utilização de alta corrente de plasma que pode ser usada para atingir condições de ignição somente com o aquecimento ôhmico.²

O objetivo principal do experimento CECI é estudar o mecanismo de geração de inversão do campo pelo efeito dínamo. Para atingir este objetivo é necessário determinar alguns parâmetros importantes da descarga como densidade, temperatura iônica e eletrônica, perfis radiais das componentes poloidal e toroidal do campo magnético de equilíbrio etc.

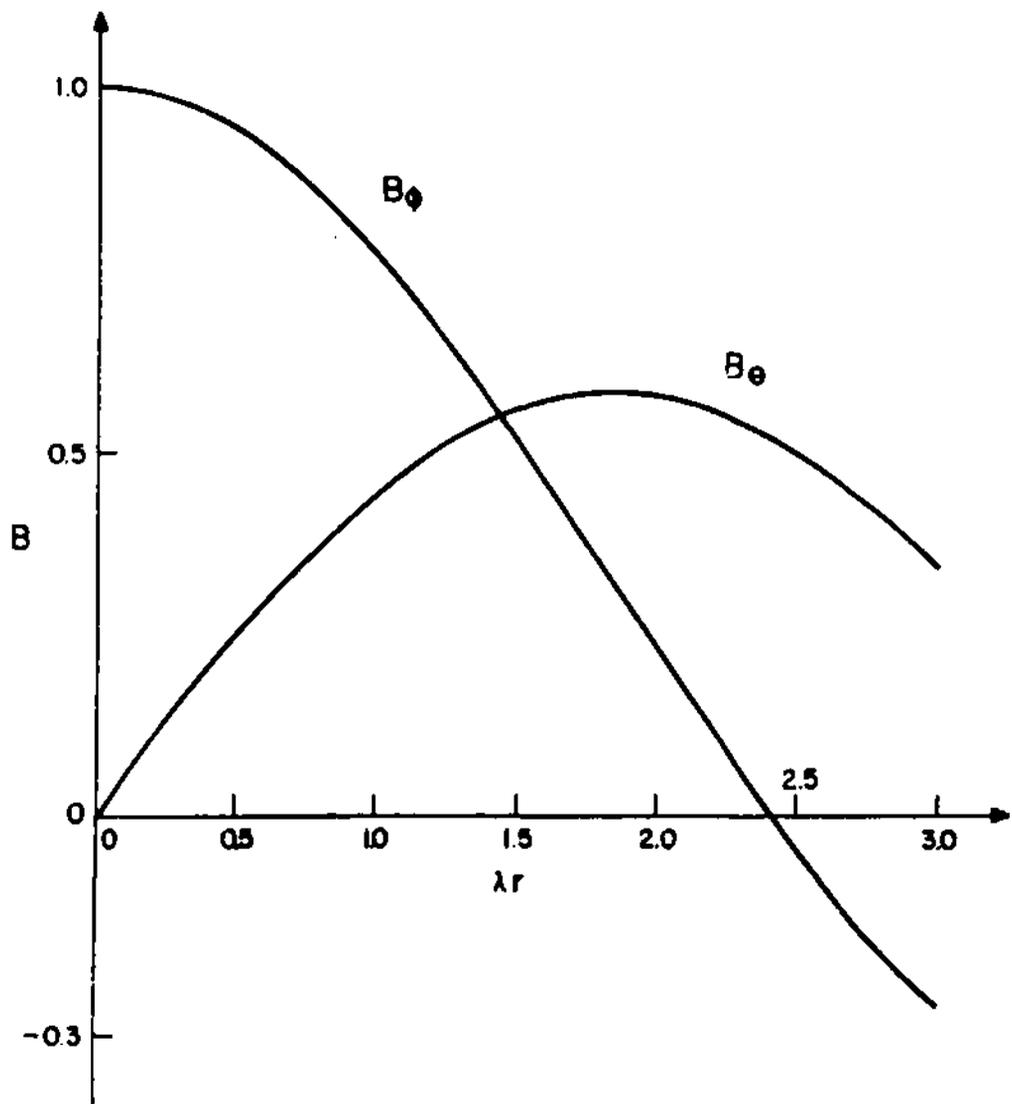


Fig. 1.1 - Perfís radiais do campo toroidal B_ϕ e campo poloidal B_θ num RFP, baseado no Modelo de Função de Bessel

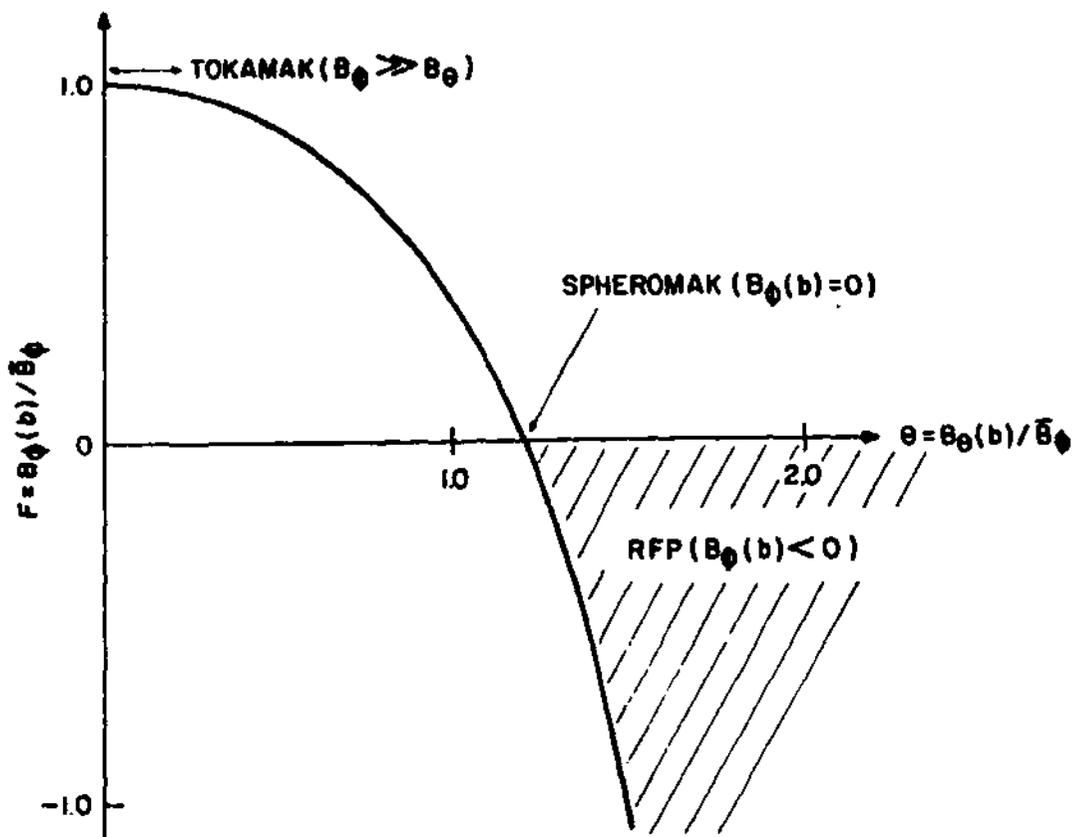


Fig. 1.2 - Diagrama $F - \Theta$. A curva sólida indica o "locus" do estado de mínima energia baseado no Modelo de Função de Bessel

Os diagnósticos espectroscópicos do plasma gerado no CECI, descritos neste relatório, foram utilizados para fornecer a temperatura iônica do plasma pelo alargamento Doppler de linhas de emissão, a temperatura eletrônica pelo método da razão das intensidades e também para o estudo do efeito de impurezas na descarga.

CAPÍTULO 2

DISPOSITIVO CECI

O desenho esquemático do dispositivo CECI (Configuração de Estrutura de Campo Inverso) está mostrado na Figura 2.1. As características principais do dispositivo são: raio maior de 12 cm; raio menor de 4,2 cm; 18 bobinas toroidais (4 voltas cada) refrigeradas a água para gerar um campo magnético DC toroidal de até 400 G; bobina poloidal com 80 ou 40 voltas, que é pulsada com um banco de capacitores de $16,85\mu F$ (tipicamente operado a 5 kV) e uma casca de cobre de 2 mm de espessura (o qual envolve um vaso toroidal feito de pirex) para controle das instabilidades que forem excitadas no plasma. A pressão de base obtida com uma bomba difusora acoplada a uma bomba mecânica é de 1×10^{-6} Torr. A pressão de trabalho que usa gás He é tipicamente de $10^{-4} - 10^{-3}$ Torr. Na Figura 2.2 mostra-se o perfil temporal típico da corrente de plasma obtido no CECI.

Uma descarga é iniciada com canhão de elétrons por emissão termoiônica, com filamento de tungstênio a 2500 K e tensão catodo-anodo de 100 V. O preaquecimento é obtido gerando corrente na bobina poloidal e descarregando um banco de capacitores de $0,25\mu F$, operado a 8 kV de carga. No primeiro máximo de corrente de preionização, descarrega-se o banco principal invertendo subitamente a corrente na bobina poloidal. O plasma é então confinado pela atuação combinada do campo poloidal pulsado, que é gerado pela corrente de plasma, e com o campo toroidal, que consiste na parte DC aplicada externamente e na parte pulsada que é gerada pelo efeito dínamo. Um campo vertical é usado para o posicionamento correto da coluna de plasma, além do campo de compensação para a redução de campos expúrios (< 30 G). Os parâmetros de operação numa descarga padrão são: voltagem de carga de 5 kV no banco poloidal médio de 60 G, voltagem de carga do banco vertical e banco de compensação de 4 kV. Com estes parâmetros de operação tem sido possível obter plasmas no dispositivo CECI com os seguintes parâmetros: corrente de plasma de 1,5 kA, duração de descarga de $150\mu s$, temperatura de elétrons de cerca de 10 eV, temperatura de íons de cerca de 3 eV e densidades de pico de cerca de 5×10^{12} a 10^{13} cm^{-3} .

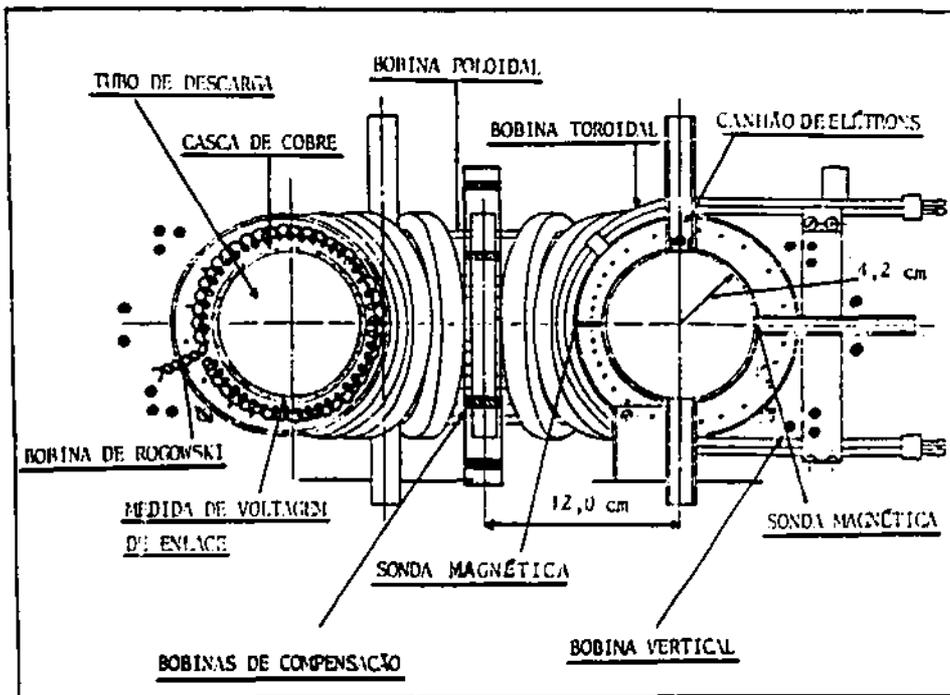


Fig. 2.1 - Desenho esquemático do dispositivo CECI com alguns diagnósticos básicos utilizados.

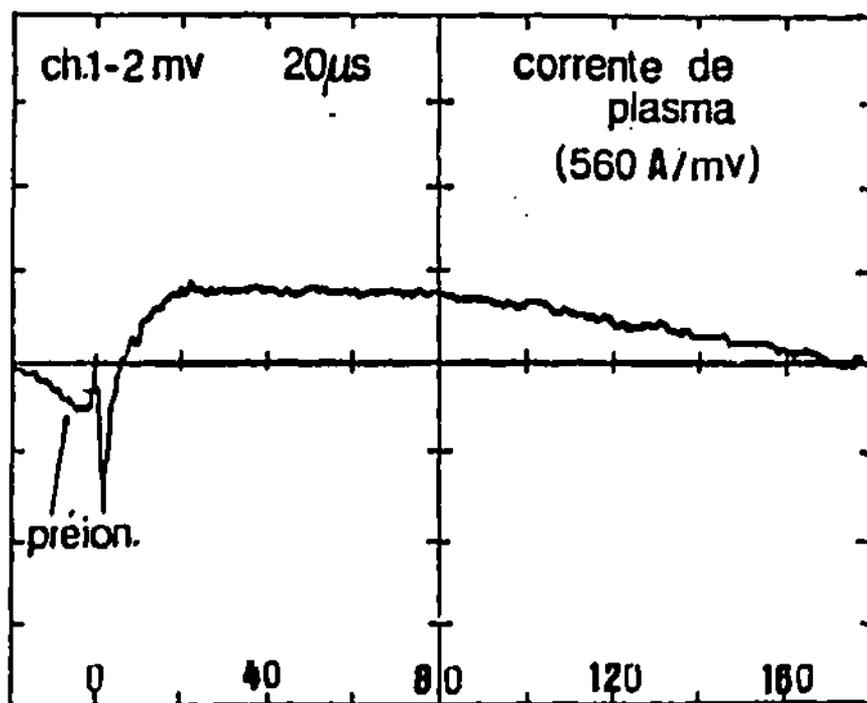


Fig. 2.2 - Perfil temporal da corrente de plasma gerado no dispositivo CEI.

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DO ESPECTRÔMETRO COM DETEÇÃO POR FOTOMULTIPLICADORA

O espectrômetro utilizado neste experimento tem as seguintes especificações técnicas:

- marca: Jobin-Yvon,
- modelo: HR-640S,
- montagem ótica: Czerny-Turner Assimétrica,
- comprimento focal: 640 mm,
- abertura: $f/7$,
- rede de difração : plana, intercambiável (110 mm × 110 mm),
- “range” espectral: 1650 Å a 50.000 Å com redes de difração intercambiáveis,
- entrada/saída de luz: axiais,
- dispersão: 12 Å/mm em $\lambda = 5000 \text{ Å}$ com rede em uso,
- resolução (teórica): 0,16 Å com rede atual de 1200 ranhuras/mm (80 × 110 mm), em $\lambda = 5460 \text{ Å}$, com abertura de fenda de 5 – 10 μm e altura de 2 mm,
- precisão de leitura de: $\Delta\lambda = 0.5 \text{ Å}$ com rede de 1200 ranh./ mm,
- luz extraviada: $< 10^{-8}$, em $\lambda = 10 \text{ Å}$ usando linha de laser 5145 Å, com abertura de fenda de 20 μm e altura de 2 mm,
- tamanho: 806 × 482 × 350 mm,
- peso: 65 kg,
- controle: somente controle eletrônico (SPECTRALINK) para movimentar o motor de passo para a rotação da rede de difração .

Na Figura 3.1 mostra-se o desenho em escala do espectrômetro HR-640S.

Para a detecção dos espectros foi utilizada uma fotomultiplicadora do tipo “side-on”, modelo IP28, da marca RCA. O circuito utilizado na alimentação

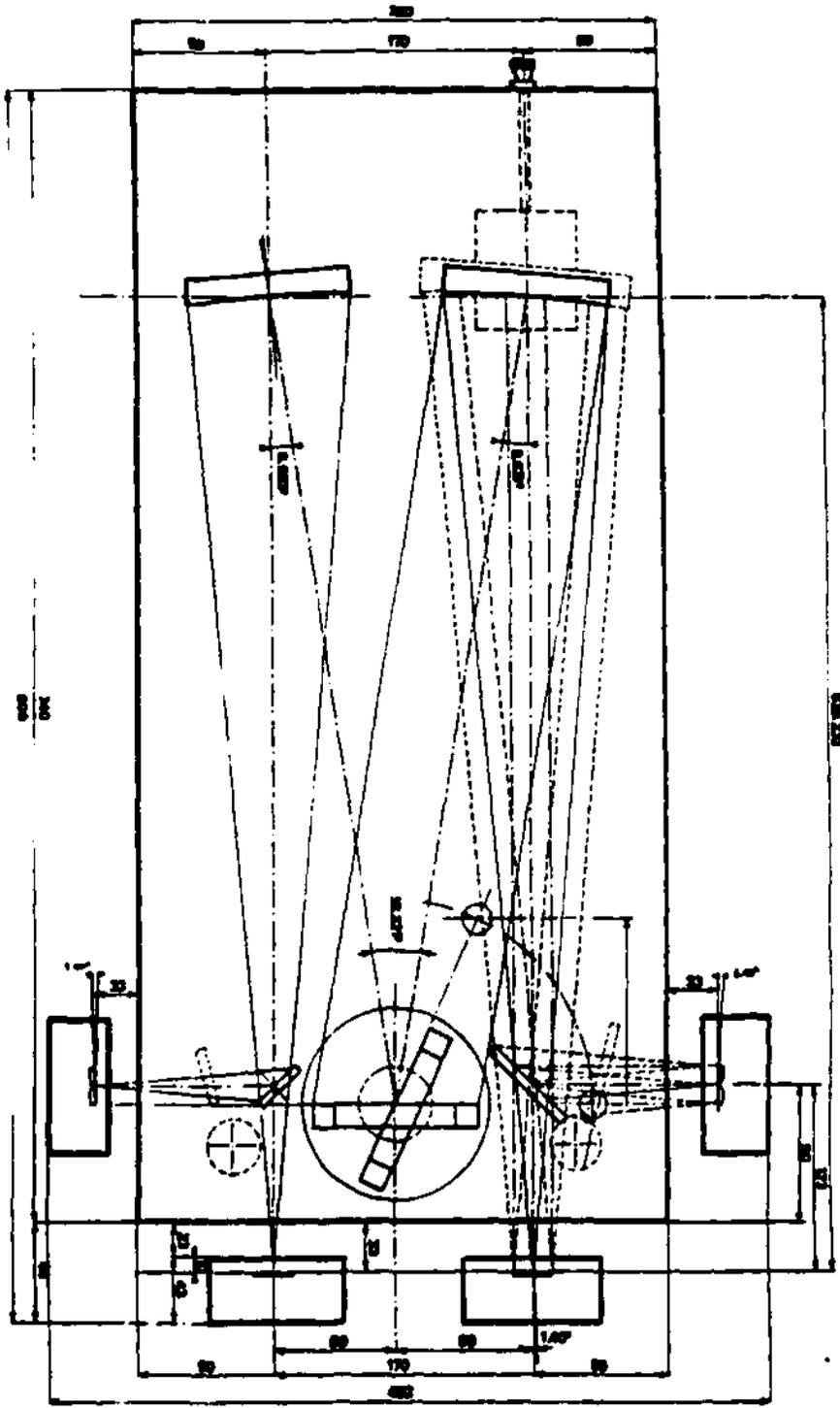


Fig. 3.1 - Desenho em escala do espectrômetro HR-640S.

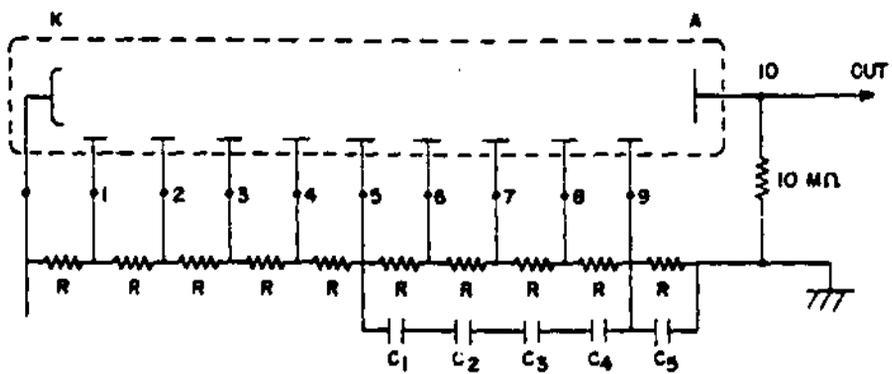


Fig. 3.2 - Circuito para alimentação da fotomultiplicadora IP28.

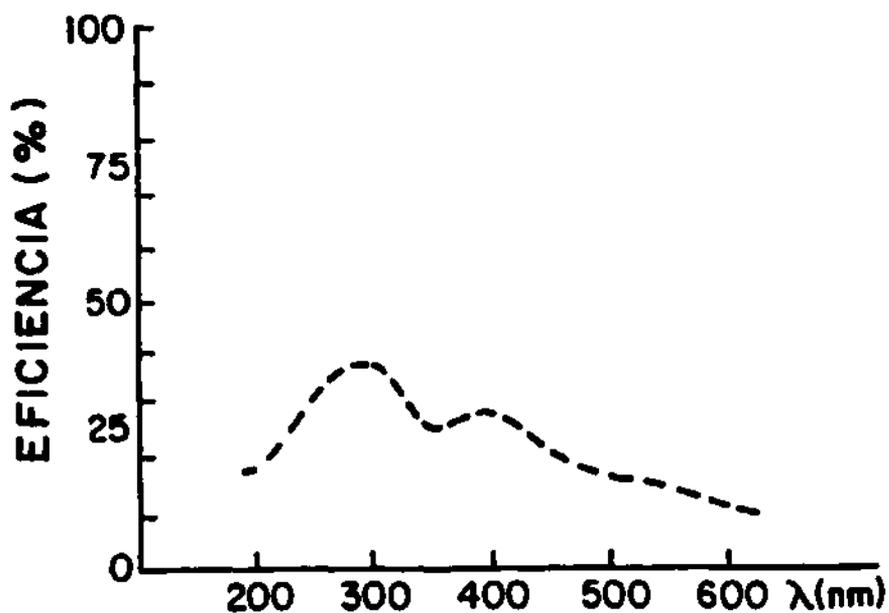


Fig. 3.3 - Eficiência da rede de difração utilizada no espectrômetro.

desta fotomultiplicadora e da detecção dos sinais dela proveniente está mostrado na Figura 3.2.

A sensibilidade da rede de difração (com respeito ao comprimento de onda da luz) usada neste experimento, fornecida pelo fabricante, é mostrada na Figura 3.3.

A resposta espectral da fotomultiplicadora IP28 obtida do catálogo é mostrada na Figura 3.4.

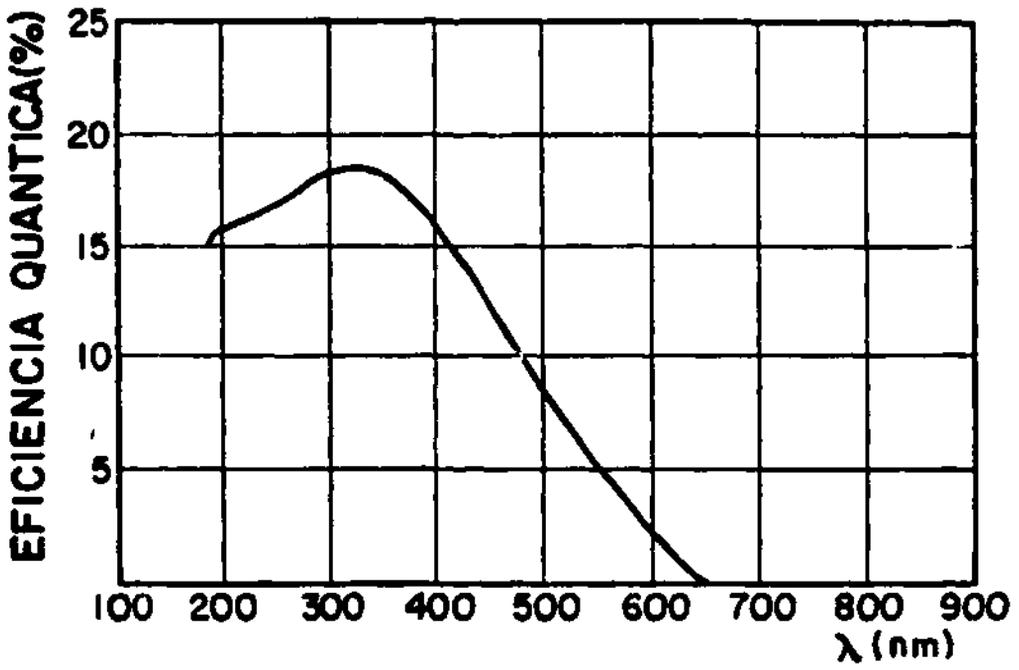


Fig. 3.4 - Resposta espectral da fotomultiplicadora IP28 da RCA (curva S5).

CAPÍTULO 4

ALINHAMENTO DOS COMPONENTES ÓTICOS DO ESPECTRÔMETRO E RESOLUÇÃO ESPECTRAL OBTIDA

O arranjo experimental utilizada para o alinhamento do espectrômetro é mostrada nas Figuras 4.1 e 4.2. Um alinhamento preliminar (só fazendo ajustes indicados no manual do espectrômetro) forneceu uma resolução inadequada para a aplicação principal deste espectrômetro, que é a determinação da largura das linhas de emissão do plasma produzido no CECI. Como pode ser visto no gráfico da Figura 4.3, não se atingiu resoluções melhores do que 1,3 Å naquela primeira tentativa de alinhamento (que devido à falta de equipamento ótico adequado levou cerca de 4 meses). Após uma longa reforma no laboratório de plasma (cerca de 3 meses), foi iniciada uma nova tentativa de alinhamento mais preciso do sistema ótico. Para este alinhamento os seguintes passos foram seguidos:

- 1) ajustes das fendas para atingir o melhor paralelismo das lâminas que constituem a fenda;
- 2) obtenção do foco correto (imagem da fenda de entrada focalizada na fenda de saída);
- 3) alinhamento dos espelhos e da rede de difração com o feixe de laser He-Ne (o feixe deve ser alinhado para incidir no centro da fenda de entrada, no centro do espelho colimador, no centro da rede, no centro do espelho telescópico e finalmente no centro da fenda de saída, ajuste este realizado com o leitor de comprimento de onda ajustado no zero);
- 4) rotação do sistema de fenda de saída com relação à imagem da fenda de entrada, para ajustá-lo à direção da ranhura da rede de difração ;
- 5) ajustes dos espelhos e da rede de difração para a obtenção da leitura correta do comprimento de onda.

Após cuidadosos ajustes e alinhamentos (tentados por inúmeros ciclos), obteve-se o resultado da Figura 4.4. Várias informações sobre a resolução do espectrômetro podem ser obtidas a partir deste gráfico. Usando uma fonte de luz da FUNBEC que emite linhas de Hg, usando altura da fenda de $h = 5$ mm, e a mesma largura para fendas de entrada e saída, obtiveram-se pontos indicados por e. Com a redução de h para 2 mm, a resolução do espectrômetro é sensivelmente melhorada para a abertura de fenda menores. Fixando a abertura da fenda de saída em $10 \mu\text{m}$, variando a de entrada e com uma melhor iluminação da fenda de entrada (fonte da Oriel), a resolução melhora ainda mais. Finalmente, usando a mesma fonte,

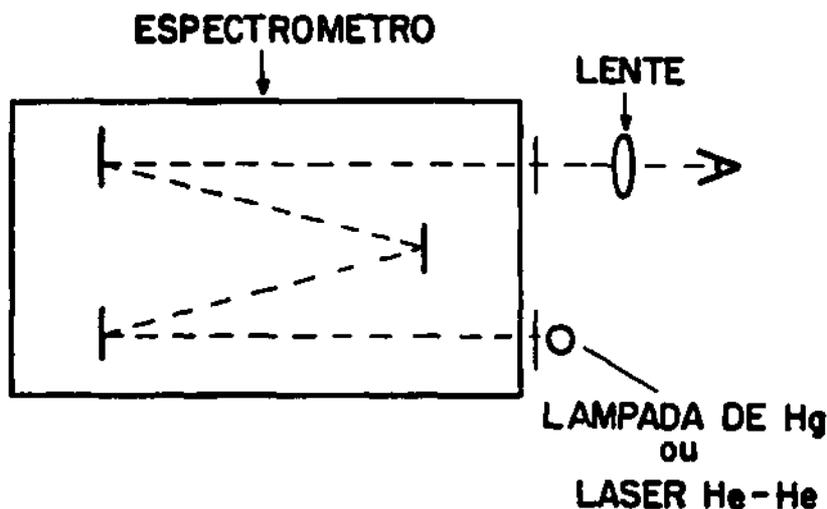


Fig. 4.1 - Montagem ótica para ajustes dos componentes do espectrômetro.

com $h = 1 \text{ mm}$ e com fenda de saída de $5 \mu\text{m}$, obteve-se uma resolução recorde de $0,3 \text{ \AA}$, para a abertura de fenda de entrada de $10 \mu\text{m}$. Como foi notado no resultado preliminar, fazendo o alinhamento com a lâmpada da FUNBEC para aberturas de fenda $> 50 \mu\text{m}$, a resolução cai linearmente com o λ . Devido a distorção da imagem na fenda de saída, a resolução do espectrômetro não segue a linha reta, tendendo no entanto a saturar em $0,6 \text{ \AA}$, para este caso. Com uma melhor iluminação ou usando aberturas de fenda menores, a resolução pode ser melhorada significativamente. Um gráfico que demonstra claramente o efeito da altura da fenda h na resolução é mostrado na Figura 4.5. O melhor valor de resolução obtido experimentalmente de $0,3 \text{ \AA}$ (ver Figura 4.6) é praticamente o dobro do valor teórico indicado no catálogo. Com esta resolução, decidiu-se que a parte ótica deste projeto estava adequada para realizar a medida da temperatura iônica no CECI.

Terminado o alinhamento, tentou-se determinar o erro na leitura de comprimento de onda do nosso espectrômetro. O gráfico da Figura 4.6 mostra este resultado que é importante quando medidas de emissões em descargas pulsadas como no CECI estiverem sendo efetuadas. Note-se que os pontos experimentais estão bastante espalhados para os diversos métodos de medidas empregados, mas há basicamente uma discrepância de cerca de $0,4 \text{ \AA}$ na leitura com uma tendência de piora para $\lambda = 6000 \text{ \AA}$.

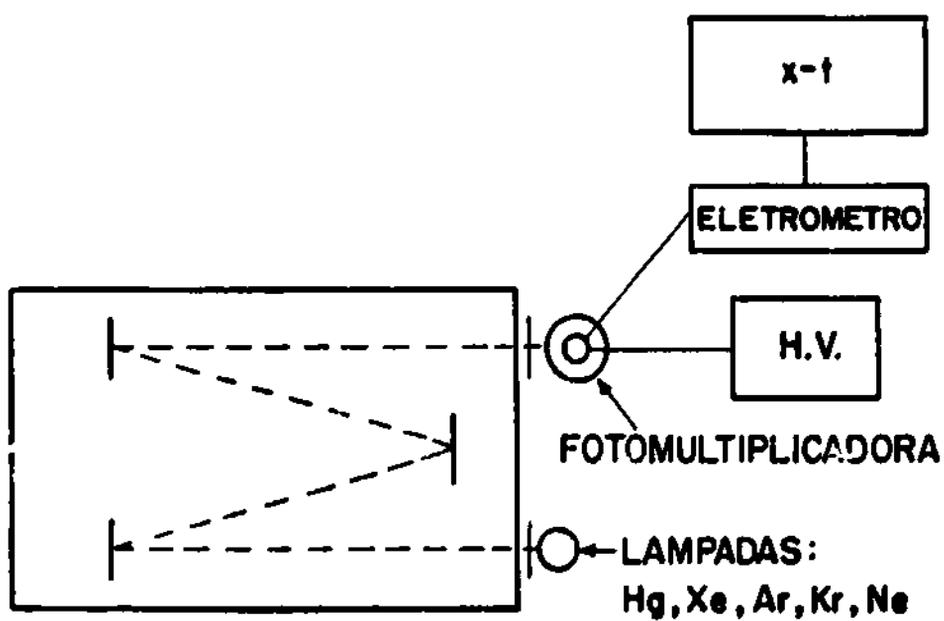


Fig. 4.2 - Montagem experimental para determinação da resolução do espectrômetro.

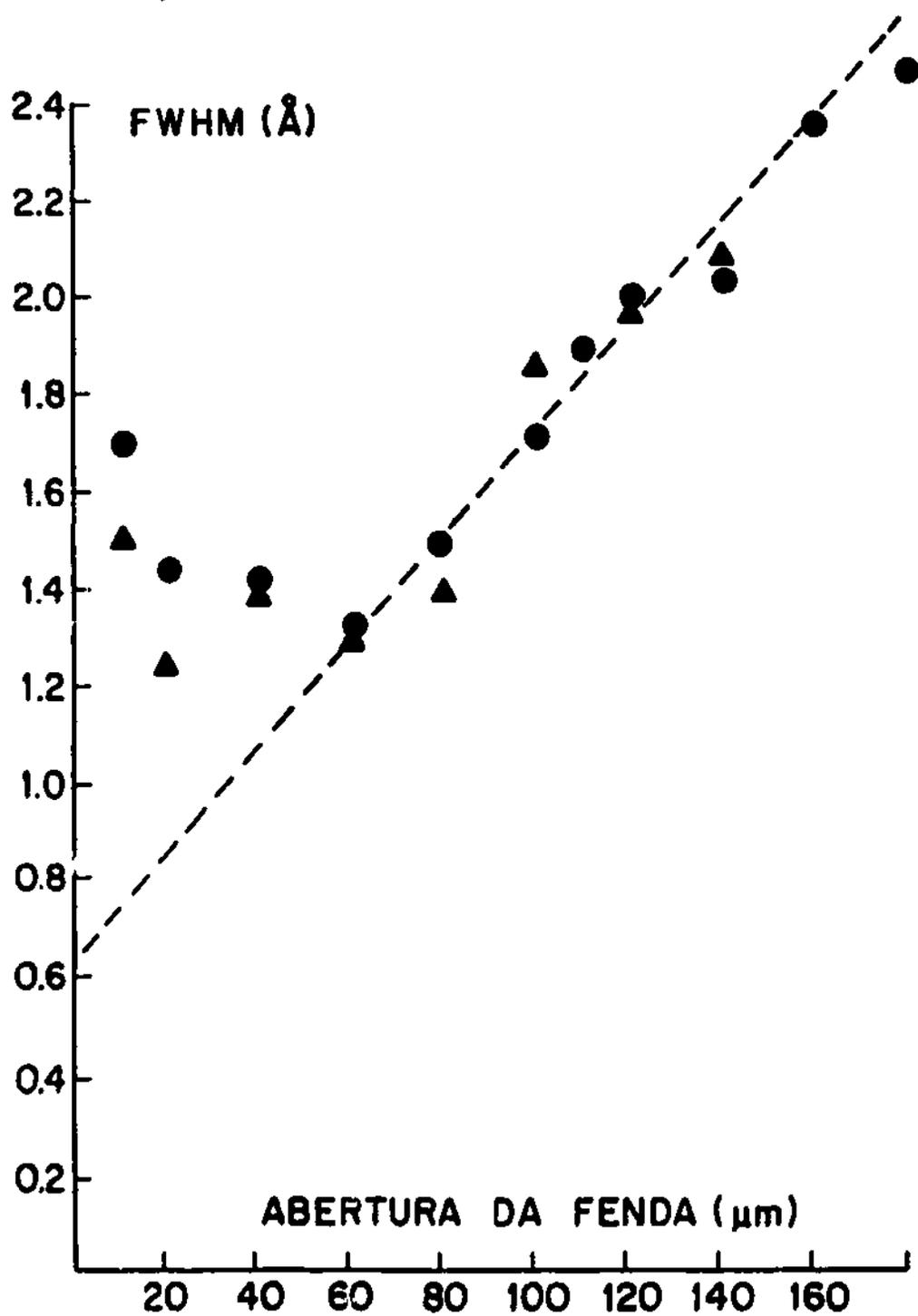


Fig. 4.3 - FWHM de uma linha de Hg versus abertura da fenda. Alinhamento preliminar.

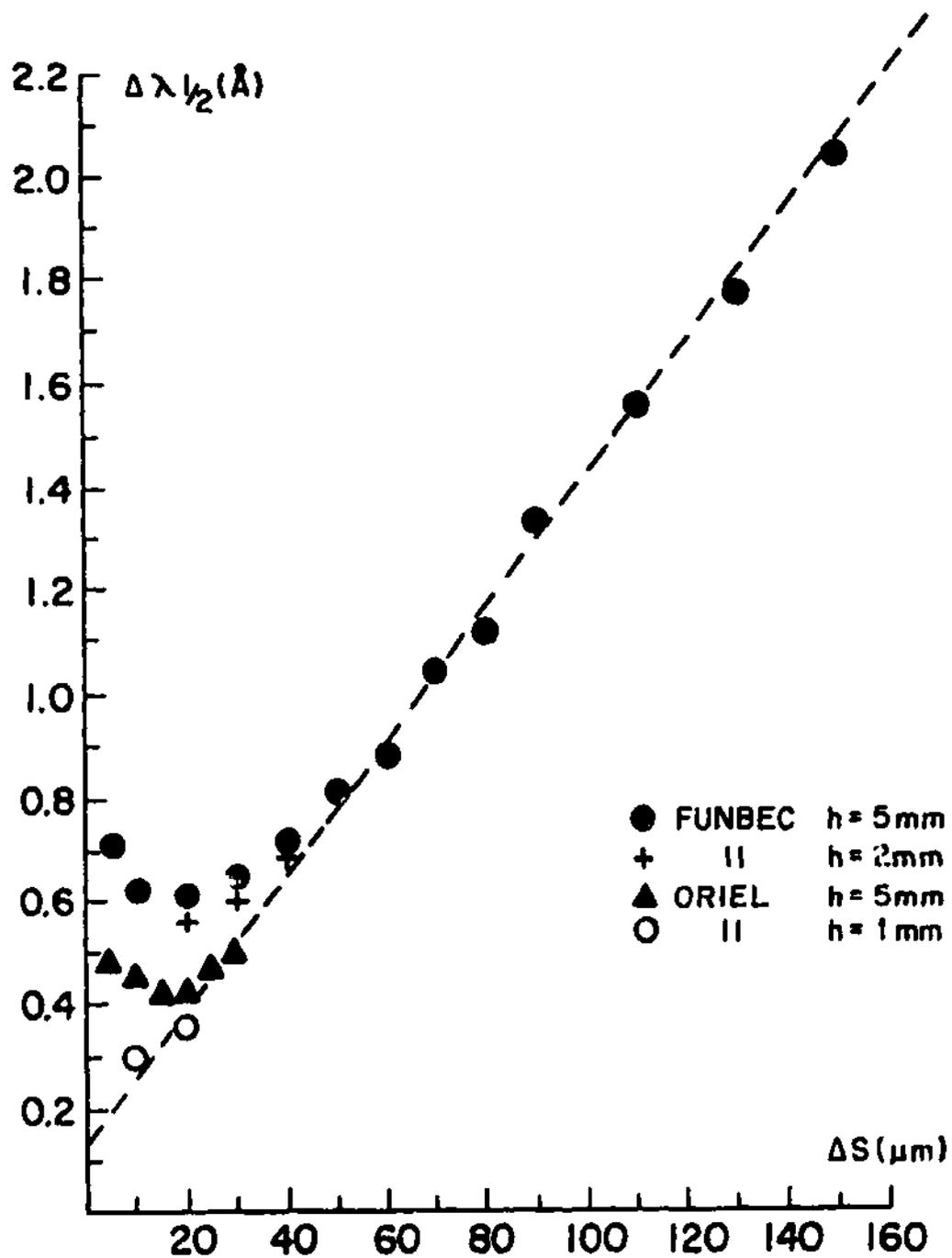


Fig. 4.4 - FWHM de uma linha de Hg versus abertura das fendas para diferentes condições de iluminação do espectrômetro.

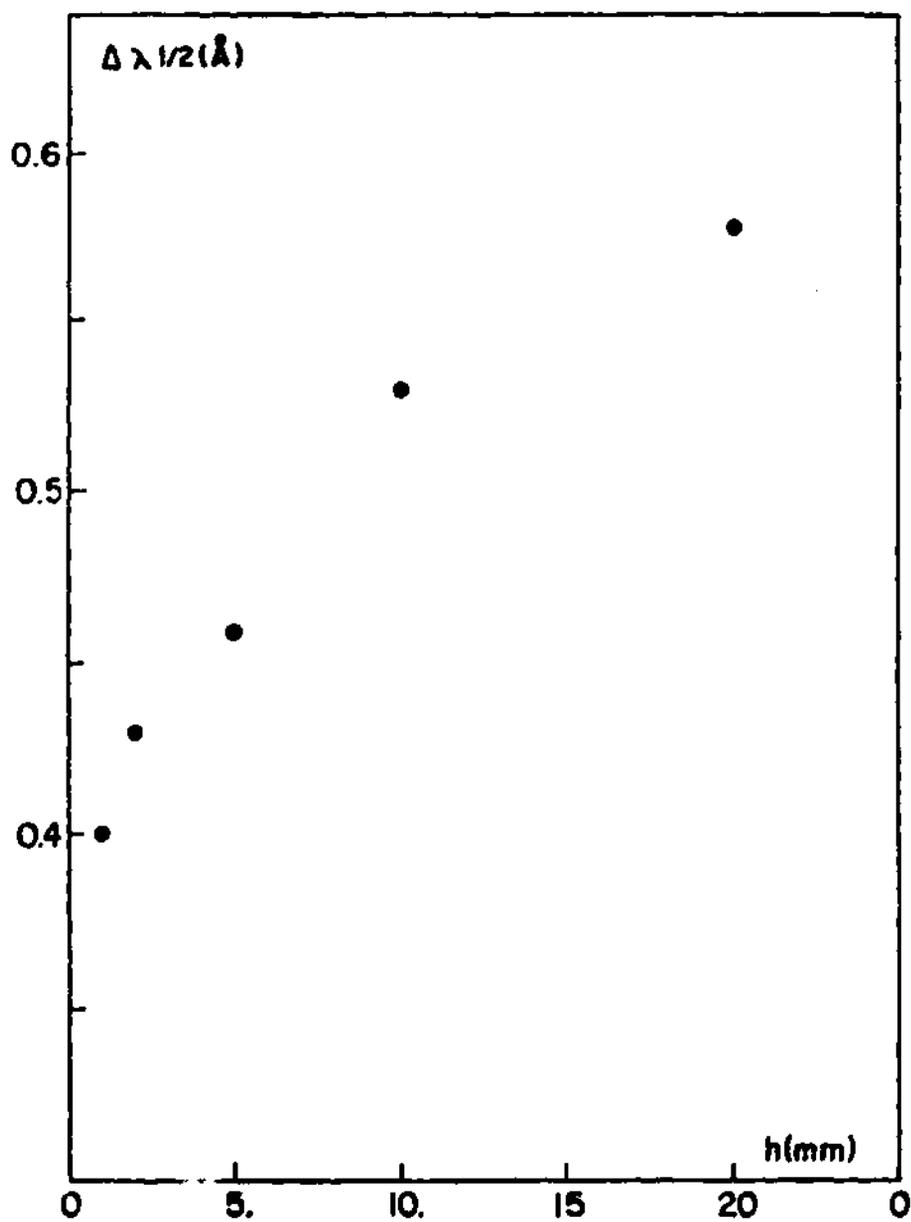


Fig. 4.5 - Efeito da altura da fenda na resolução do espectrômetro. (Abertura da fenda 30 mm).

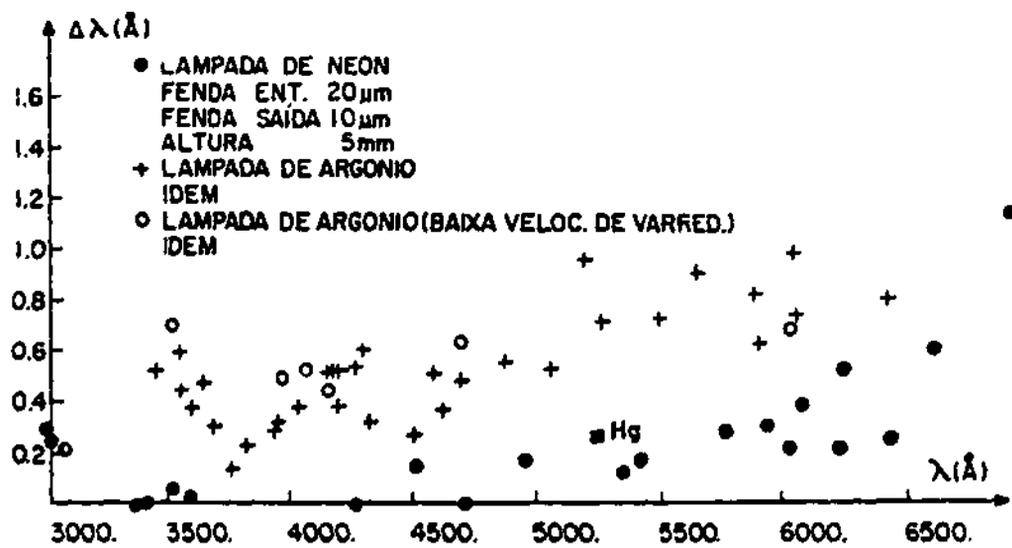


Fig. 4.6 - Erro na leitura de λ .

CAPÍTULO 5

MONTAGEM EXPERIMENTAL DO DIAGNÓSTICO ÓTICO PARA MEDIDAS DE PARÂMETROS DE PLASMA DO CECI

A Figura 5.1 mostra o esquema simplificado da montagem experimental referente a este projeto. A luz emitida pelo plasma é observada através de um par de lentes, de tal modo que emissões locais da coluna de plasma em E são coletadas pela lente L_1 e focalizadas pela lente L_2 , cujo f /number é casado com o f /number do espectrômetro. A detecção dos fótons é realizada com uma fotomultiplicadora. A única posição adequada para observações óticas no dispositivo CECI é onde fica a fenda de 2 – 3 mm, feita na casca de cobre para permitir a penetração do fluxo poloidal.

Outros diagnósticos importantes para o presente experimento estão indicados na mesma figura. As sondas magnéticas S_1 e S_2 são importantes para a medida de campos toroidal e poloidal locais, que são também necessários para a determinação do diagrama $F - \Theta$. A sonda eletrostática é útil para estimar a densidade do plasma. A bobina de Rogowski fornece a corrente de plasma que flui no dispositivo. Todos estes diagnósticos adicionais são importantes para interpretar corretamente os resultados espectroscópicos e também para se entender melhor o comportamento do plasma. Na fotografia da Figura 5.2 mostra-se a montagem experimental do sistema ótico para realização da medida de parâmetro do plasma no CECI.

O espectrômetro HR-640S é colocado em cima de uma mesa (semi-ótica) mirando uma parte do plasma toroidal. A luz analisada pelo espectrômetro é colhida pela fotomultiplicadora e o sinal proveniente deste detetor é registrado num osciloscópio digital junto com os dados obtidos com outros diagnósticos. Um espectrômetro de baixa resolução (H-20) que será usado futuramente para monitoramento da luz emitida pelo plasma também está colocado sobre a mesa.

Na fotografia da Figura 5.3 mostra-se em mais detalhes o arranjo ótico do experimento. O alinhamento do espectrômetro para a medida da emissão da luz do plasma é realizado com o laser de $He - Ne$ incidindo a luz pela fenda de saída e alinhando o feixe com a fenda na casca de cobre, através das lentes. Nesta foto também pode ser visto o sistema mecânico que permite a inserção de sondas eletrostáticas dentro do plasma.

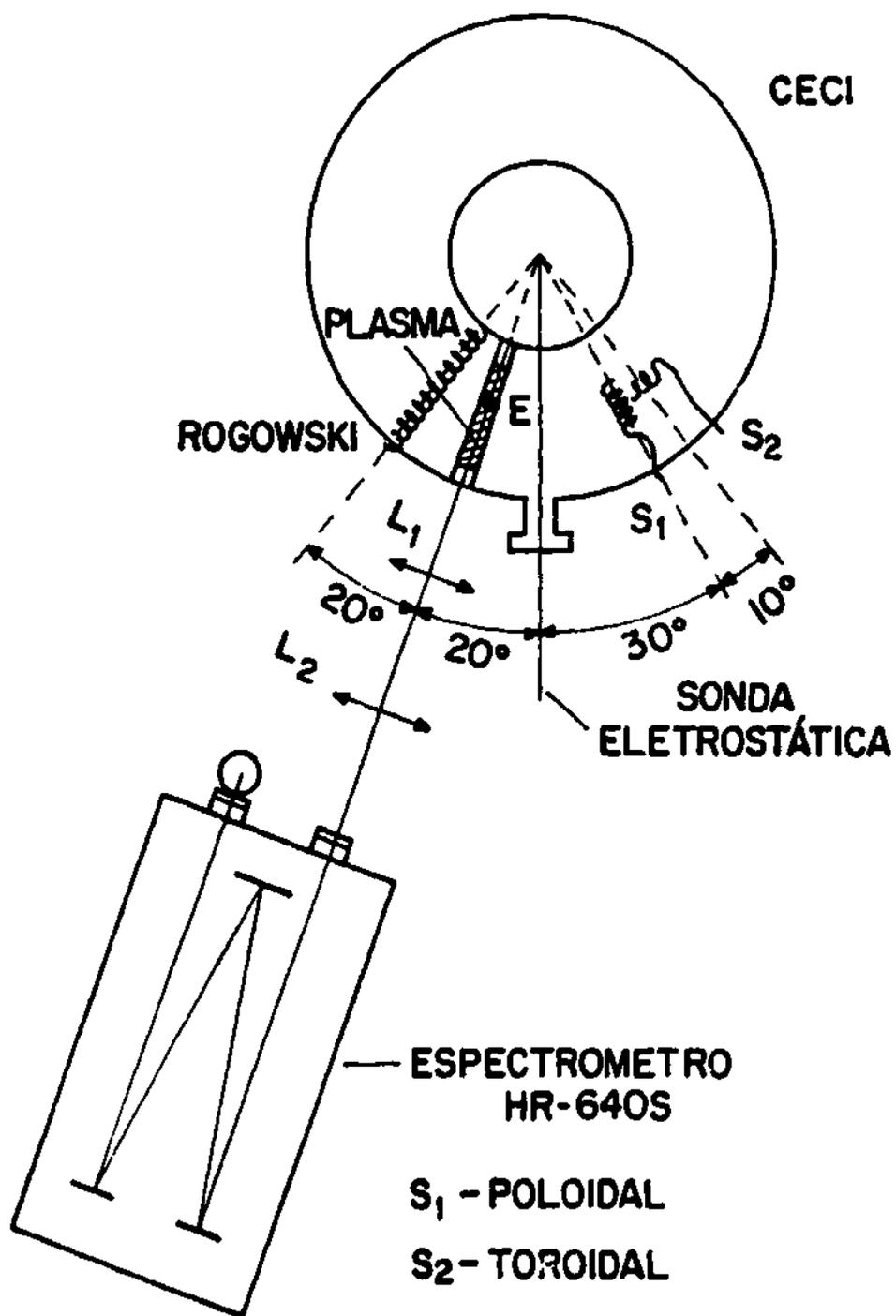


Fig. 5.1 - Montagem experimental do diagnóstico espectroscópico no CECl.

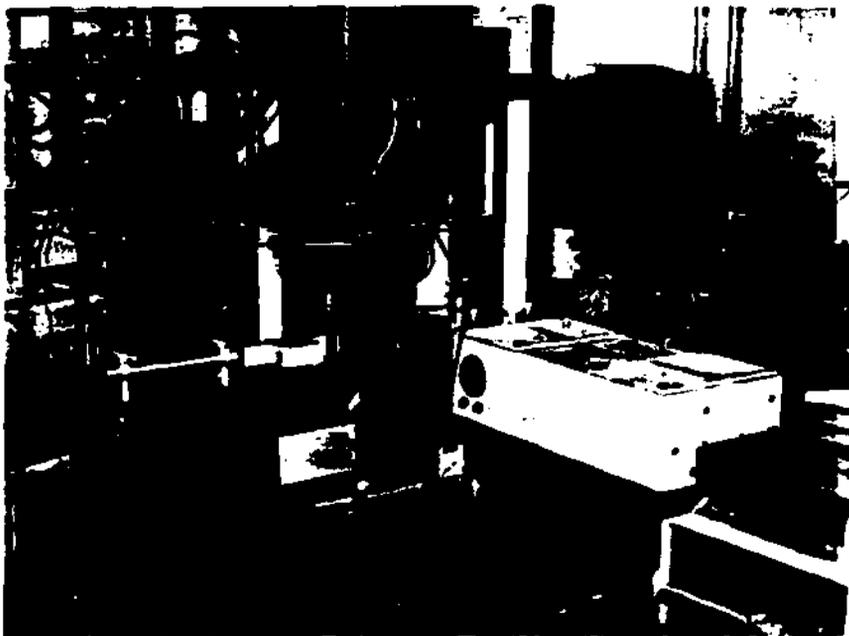


Fig. 5.2 - Fotografia da montagem experimental do espectrômetro no CECI.

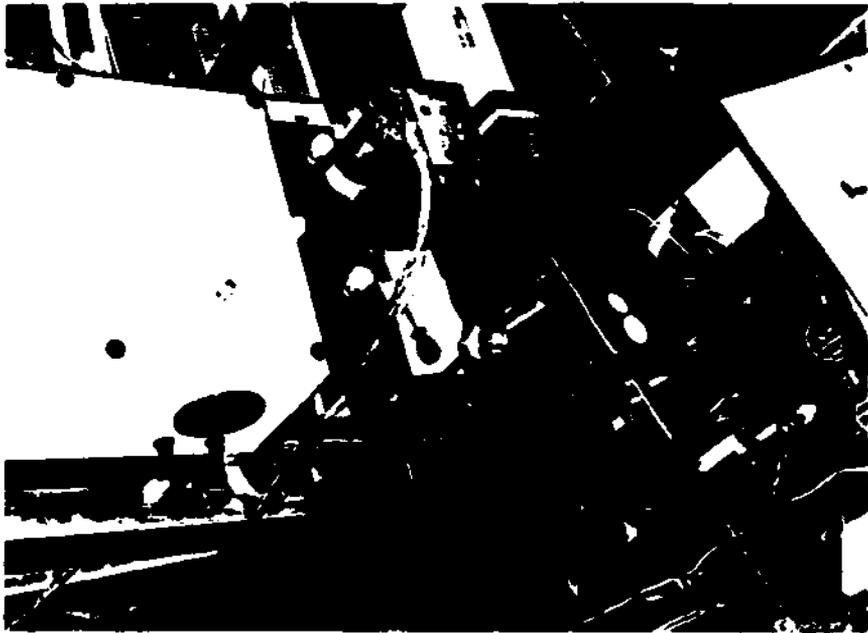


Fig. 5.3 - Detalhe da parte ótica do experimento.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 MEDIDA DA TEMPERATURA IÔNICA NO CECI PELO ALARGAMENTO DOPPLER DE LINHA DE EMISSÃO

A temperatura iônica do plasma pode ser obtida através da medida do alargamento Doppler de linha de emissão de átomos ou íons que constituem o plasma. O alargamento de linha por efeito Doppler é dado por (3)

$$\Delta\lambda_{1/2}(\text{Å}) = 7,7 \times 10^{-5} \lambda_0(\text{Å}) \sqrt{\frac{T_i(\text{eV})}{A}}, \quad (6.1)$$

onde A é o peso atômico do íon ou átomo em unidade de massa atômica e $\Delta\lambda_{1/2}$ é a largura a meia altura da linha de comprimento de onda λ_0 . Por exemplo, para linha de *HeII* 4686 Å, o alargamento Doppler é de 1,3 Å quando a temperatura do plasma é de 50 eV. O alargamento Doppler é o alargamento dominante em tipo de plasmas de baixa densidade ($< 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) como do CECI. Presentemente, o gás hélio é tipicamente usado nas descargas do CECI. O gás hidrogênio também pode ser usado mas com a duração da descarga bem menor. Portanto, esperava-se que se pudesse obter facilmente a largura da linha de 4686 Å *HeII*. Constatou-se no entanto que devido ao baixo grau de ionização do plasma, obtido em disparos com corrente de plasma de 1,5 kA, esta linha é bastante fraca, o que obriga a utilização de fendas com aberturas de 100 – 200 μm para a sua detecção. Infelizmente, para estas aberturas, o alargamento instrumental é, como mostra o gráfico da Figura 4.4, superior a 1,5 Å, o que impediria a determinação da largura para temperaturas antecipadas no CECI.

Como medidas preliminares, optou-se então pelo estudo das seguintes linhas com intensidades suficientemente altas: *HI* 4861,3 Å; *HeI* 5015,7 Å e *HeI* 3888,6 Å. Os perfis temporais de emissão destas linhas (próximas ao centro da linha) são mostrados nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 junto com o perfil da corrente de plasma. Os detalhes do perfil de emissão serão analisadas numa sessão posterior; porém pode-se adiantar que as oscilações nas intensidades de luz não são meramente ruídos elétricos, mas uma manifestação real do plasma (provavelmente variações rápidas de densidade e temperatura).

Realizando a varredura das linhas acima mencionadas, disparo por disparo, os alargamentos correspondentes foram obtidos como mostrados nas Figu-

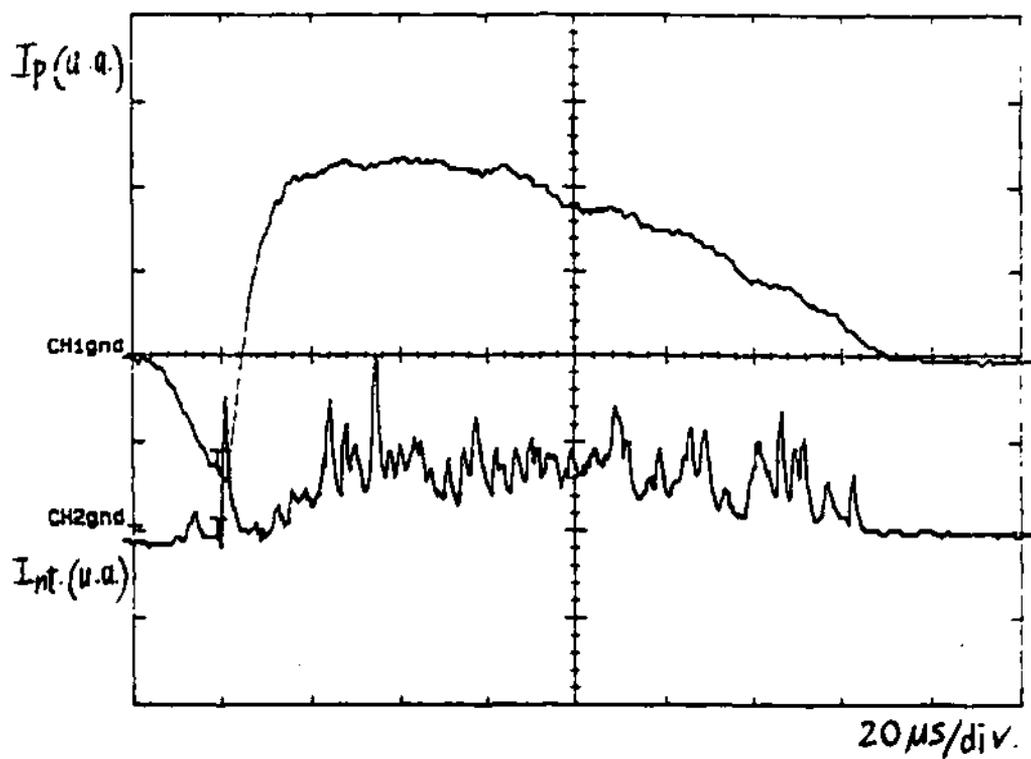


Fig. 6.1 - Intensidade da emissão da linha HI 4861,3 Å. Canal 1: corrente de plasma. Canal 2: perfil temporal de HI 4861,3 Å.

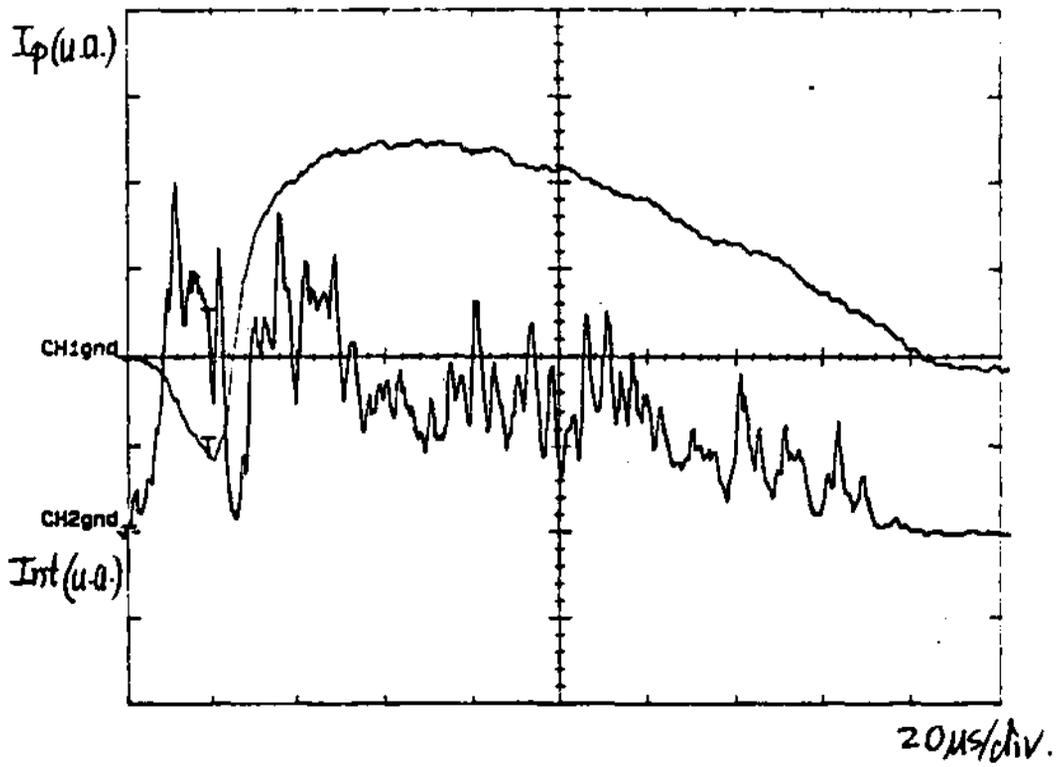


Fig. 6.2 - Intensidade da emissão da linha *HeI* 5015,7 Å. Canal 1: corrente de plasma. Canal 2: perfil temporal de *HeI* 5015,7 Å.

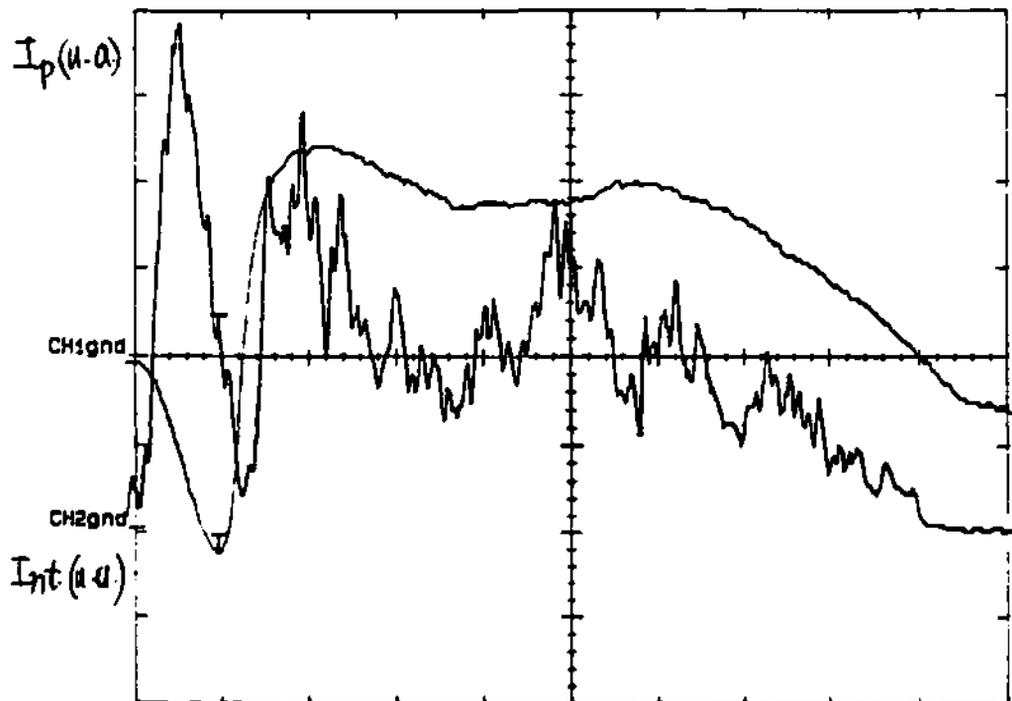


Fig. 6.3 - Intensidade da emissão da linha HeI 3888,6 Å. Canal 1: corrente de plasma. Canal 2: perfil temporal de HeI 3888,6 Å.

ras 6.4, 6.5 e 6.6. Do alargamento da linha $H\text{I}$ 4861,3 Å obteve-se $T_i = 3,5 \text{ eV}$; da linha $He\text{I}$ 5015,7 Å obteve-se $T_i = 5,4 \text{ eV}$; e da linha $He\text{I}$ 3888,6 Å obteve-se $T_i = 8,2 \text{ eV}$, todos para $t = 20 \mu\text{s}$. Portanto, na média, a temperatura dos íons no CECI é menor que 5,7 eV. Levando-se em conta o alargamento instrumental, a temperatura iônica do plasma medida é de cerca de 3 eV. Esta temperatura iônica no CECI é cerca de 10 vezes inferior à antecipada. Entretanto, como se verá adiante, uma análise cuidadosa, incluindo medidas com outros diagnósticos, dá suporte a este valor obtido espectroscopicamente.

Uma análise de dados bastante apurada que envolve digitalização e processamento de sinais (ver Apêndice A) foi realizada para a determinação do alargamento Doppler da linha $H\beta$, a partir de um grande número de dados experimentais obtidos. Os sinais foram digitalizados numa mesa digitalisadora de alta resolução (200 pontos/polegadas). O perfil gaussiano do sinal medido foi obtido do ajuste dos pontos experimentais ao perfil teórico por mínimos quadrados. Técnicas de Transformada de Fourier Rápida foram empregadas para a deconvolução dos sinais para o perfil instrumental. O resultado do ajuste é apresentado na Figura 6.7, o qual representa o alargamento da linha para $t = 120 \mu\text{s}$, após o disparo do banco principal. Além disso, foram realizadas análise por computador que permitiram a obtenção do perfil temporal da temperatura dos íons (correspondente a descarga com corrente de plasma mostrado na Figura 6.8), como mostrado na Figura 6.9. A grande flutuação na temperatura iônica é provavelmente resultante das instabilidades MHD que ocorrem no plasma. A média temporal da temperatura iônica nestas descargas seqüenciais foi de cerca de 2 eV.

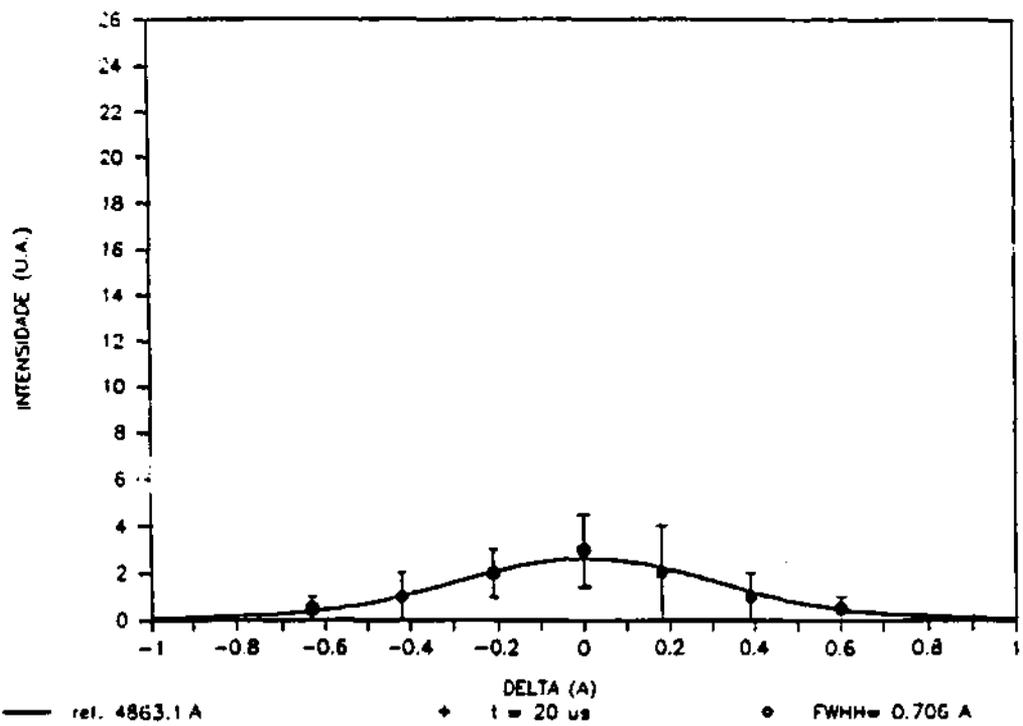


Fig. 6.4 - Alargamento Doppler da linha *HI* 4861,3 Å.

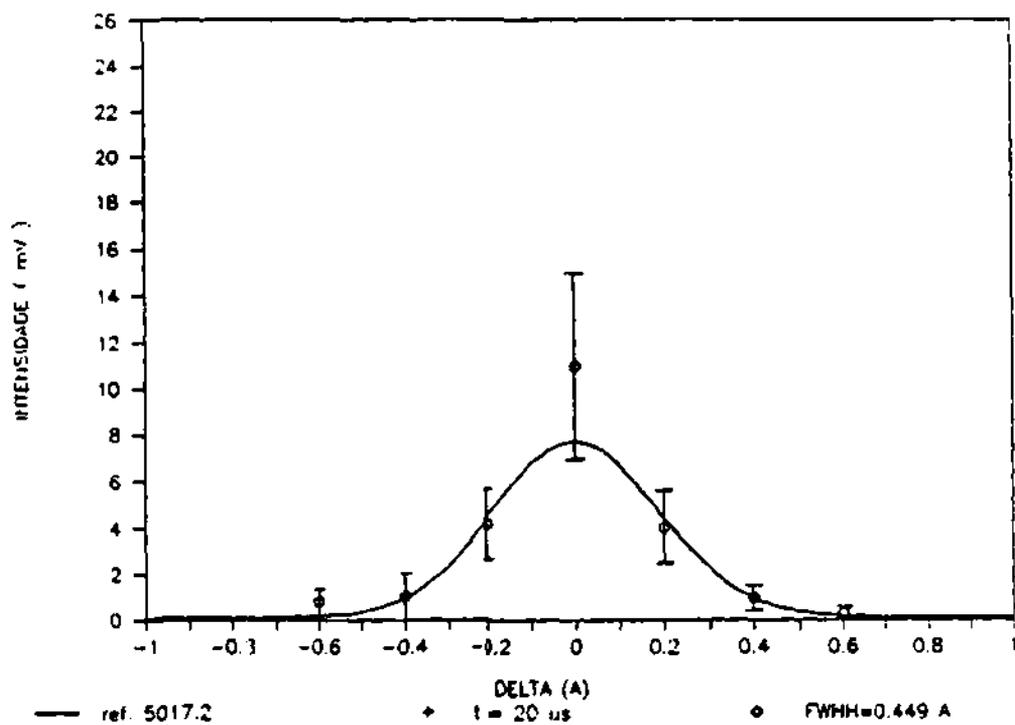


Fig. 6.5 - Alargamento Doppler da linha *HeI* 5015,7 Å.

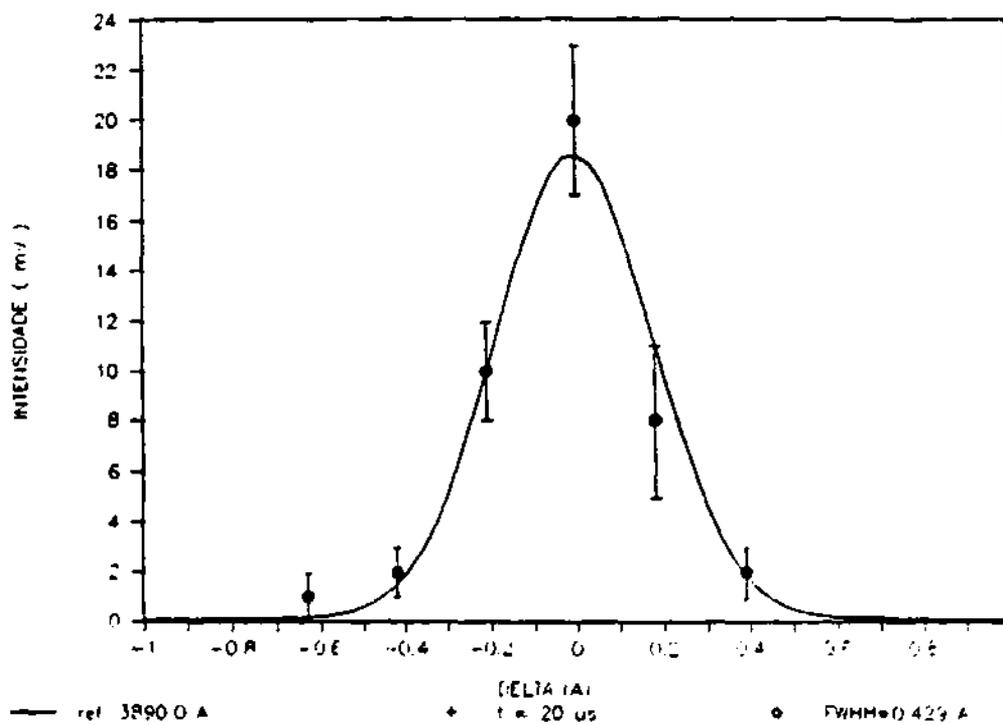


Fig. 6.6 - Alargamento Doppler da linha HeI 3888,6 Å.

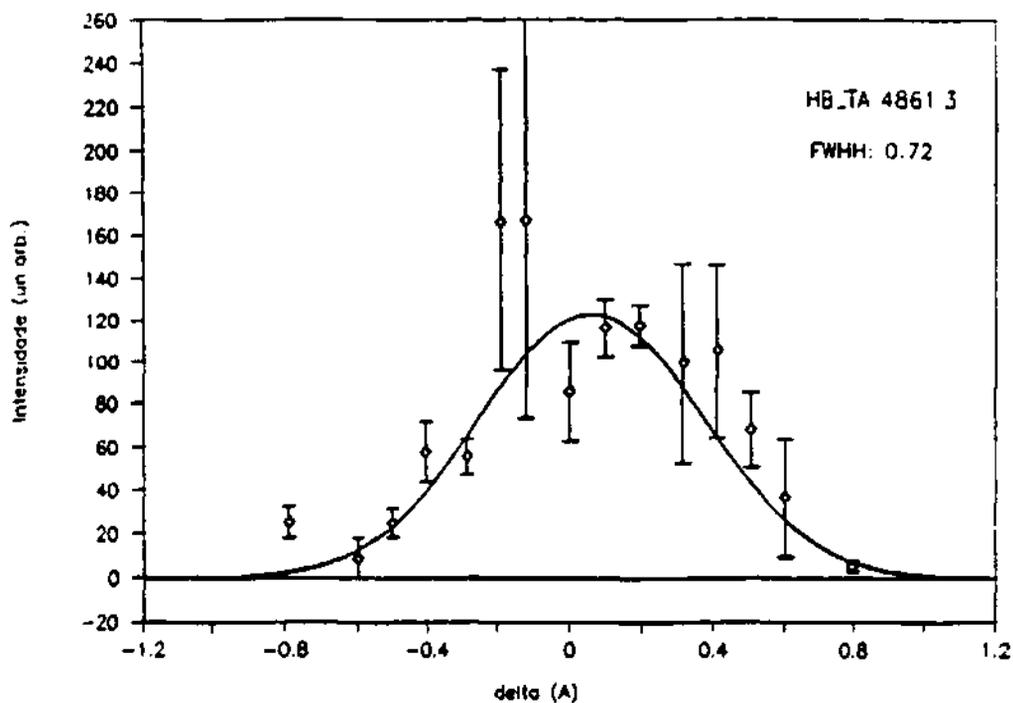


Fig. 6.7 - Alargamento Doppler da linha 4861,3 Å (em $t = 120 \mu s$) para descarga com corrente de plasma mostrada na Figura 6.8

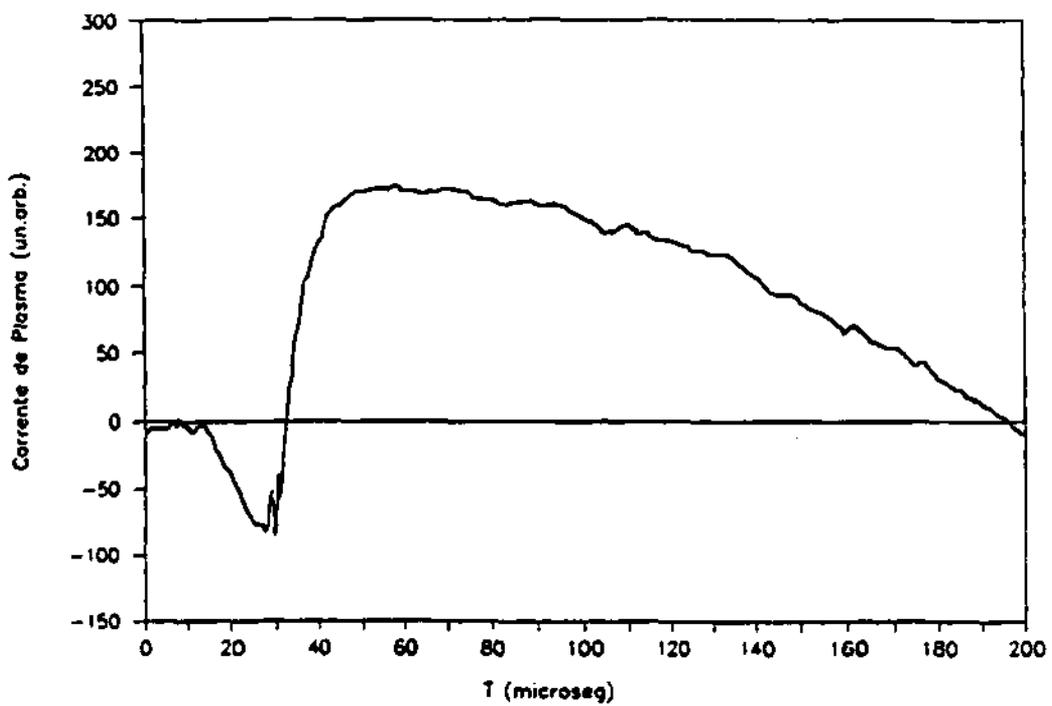


Fig. 6.8 - Perfil temporal típico da corrente de plasma das descargas para os quais foi determinado o perfil temporal da temperatura iônica.

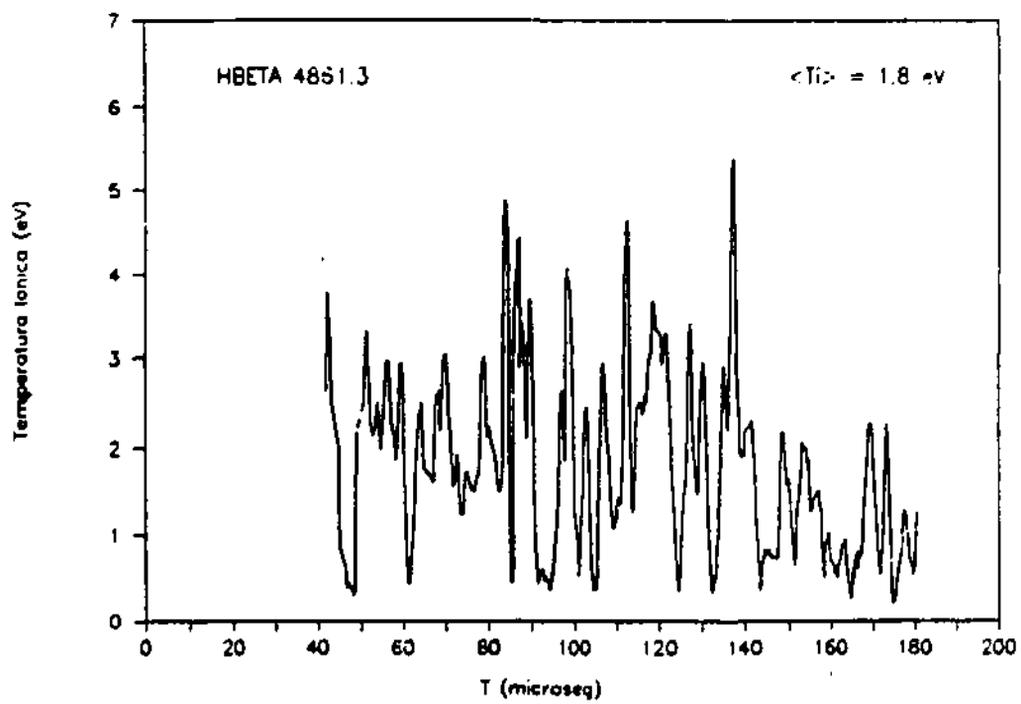


Fig. 6.9 - Perfil temporal da temperatura iónica no CECL.

6.2 MEDIDA DA TEMPERATURA DOS ELÉTRONS NO CECI

A temperatura eletrônica do plasma gerado no CECI foi medida espectroscopicamente usando o método da razão das intensidades de linhas singleto e tripleto do hélio.³ Escolhendo-se as linhas 4713 Å $HeI(2^3P - 4^3S)$ como tripleto e 4921 Å $HeI(2^1P - 4^1D)$ como singleto, a razão das intensidades varia de forma bem definida com a temperatura eletrônica, como mostrada no gráfico da Figura 6.10. As condições de validade deste método são obedecidas, em princípio, para um plasma com $n_e \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ e $T_e < 100 \text{ eV}$, que é o caso do plasma produzido no CECI.

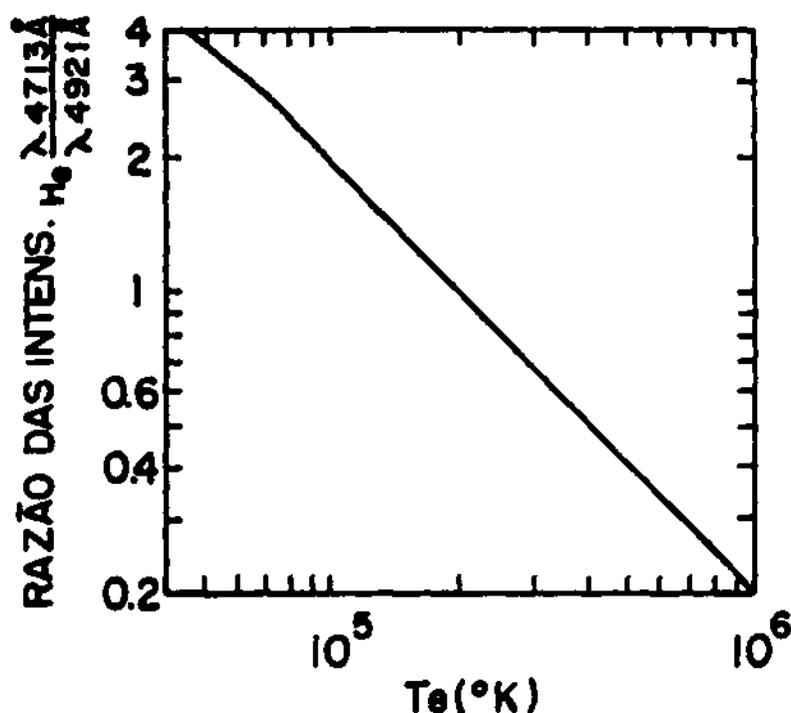


Fig. 6.10 - Gráfico da razão das intensidades de linhas 4713 Å e 4921 Å HeI versus temperatura eletrônica do plasma.

As duas linhas de hélio foram medidas em disparos consecutivos, com boa reprodutibilidade. Os perfis temporais das emissões das linhas são mostrados nas Figuras 6.11 e 6.12. Utilizando o gráfico da Figura 6.10, pode-se obter diretamente o perfil temporal da temperatura eletrônica da Figura 6.13 determinada por este método que fornece $T_e \sim 43 \text{ eV}$, para $t = 20 \mu\text{s}$ após o disparo do banco principal.

Nesta determinação utilizou-se a sensibilidade relativa do conjunto espectrômetro-detector, baseado nos dados do fabricante, mostrados nas Figuras 3.3 e 3.4. Existe uma grande discrepância entre T_i e T_e medidos espectroscopicamente. Medidas da temperatura eletrônica efetuadas com uma sonda eletrostática⁴ forneceram valores abaixo de 10 eV. Uma análise que será discutida posteriormente indica que este valor é mais aceitável segundo um modelo de plasma aqui proposto. Existe forte indício de que o baixo grau de ionização do plasma (< 5%) esteja influenciando no erro da determinação da temperatura eletrônica por meios espectroscópicos.

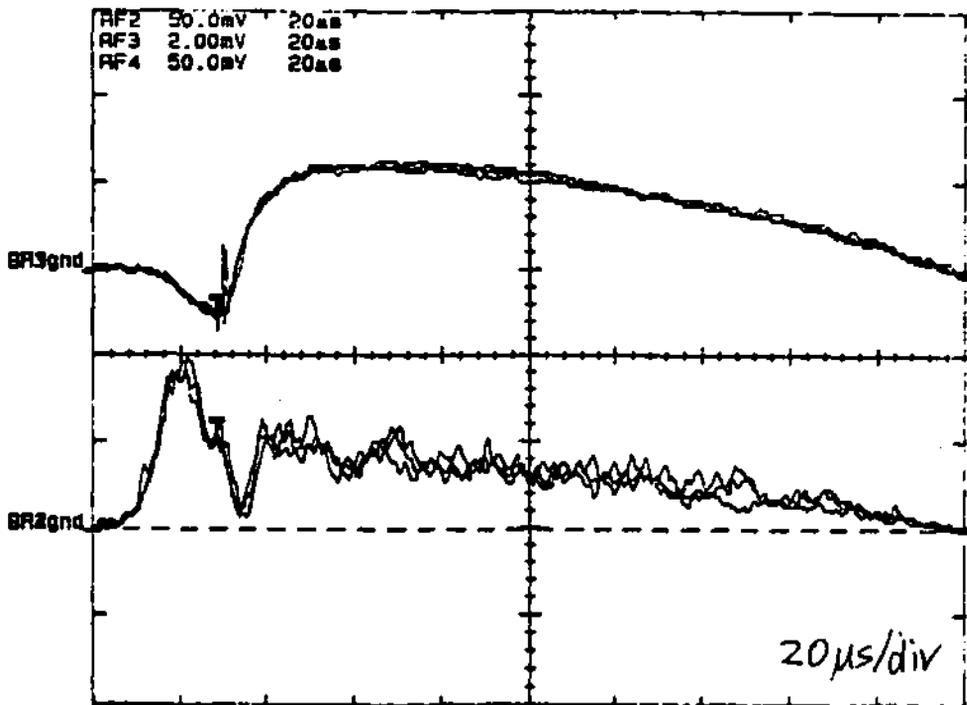


Fig. 6.11 - Perfil temporal da emissão da linha 4713 Å HeI junto com a corrente de plasma (acima).

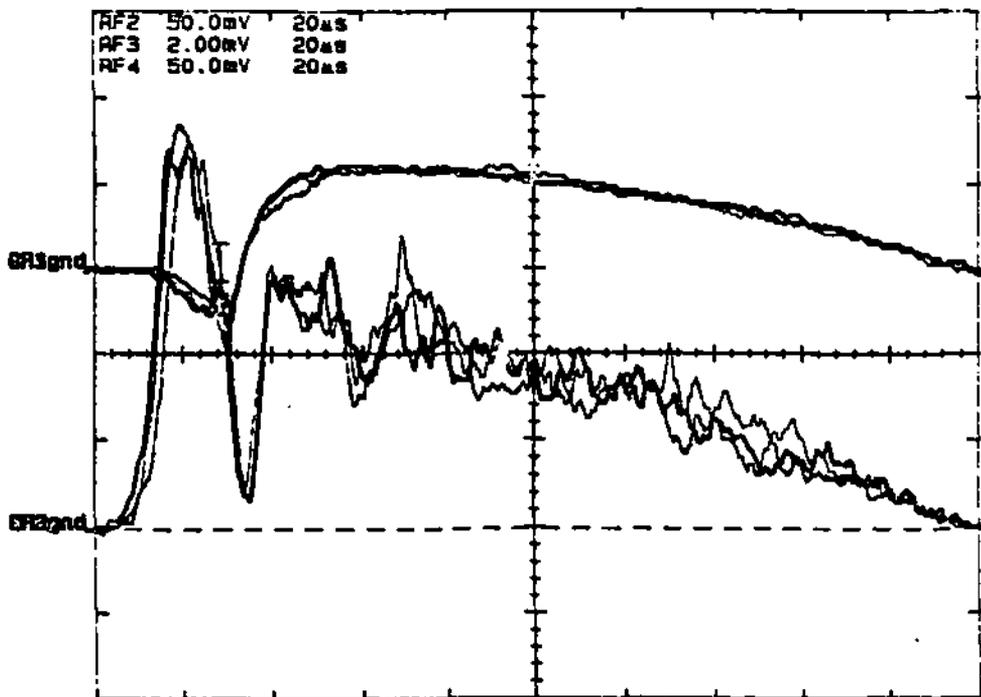


Fig. 6.12 - Perfil temporal da emissão da linha 4921 Å *HeI* junto com a corrente de plasma (acima).

6.3 MEDIDAS DE IMPUREZAS NO PLASMA

A espectroscopia é provavelmente o melhor método conhecido atualmente para a determinação de tipos e quantidade de impureza dentro de um plasma de alta temperatura. O efeito nocivo da presença de impurezas no plasma mesmo em reduzidíssima quantidade, já é bastante conhecido. Por exemplo, uma concentração de menos de 1% de elementos metálicos provenientes das paredes dos dispositivos Tokamaks pode acarretar uma perda da energia utilizada por radiação de mais de 40%.⁵ As medidas espectroscópicas das impurezas combinadas com outros métodos de diagnósticos têm permitido o estudo detalhado do transporte destes elementos e fornecido informações muito importantes sobre o confinamento do plasma em observação.⁶ Por estas razões, existe muito interesse no estudo do comportamento das impurezas dentro do plasma produzido no CECI. Numa medida espectroscópica, na qual foi usado um par de espectrômetros H-20, de baixa resolução (cerca de 5 Å), foi demonstrado que o efeito das impurezas como O, N e C no CECI é muito importante na inicialização da descarga.⁷

Nesta série de experimentos que envolve medida de efeito de impureza durante a limpeza por descarga, usou-se um método de inicialização da descarga baseada num canhão de plasma, modificado posteriormente para melhorar a performance do plasma. O gráfico da Figura 6.14 mostra a redução da impureza (OI no caso) com o número de disparos no CECI, devido ao efeito da limpeza das paredes por descarga. A figura nos mostra a variação das intensidades das linhas do oxigênio e hélio em relação ao número de disparos e dela pode-se inferir que, após um período de doze horas sem descargas no dispositivo (com 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 este número crítico de disparos não se consegue mais a produção de plasma. Neste estágio, observa-se uma queda de aproximadamente 30% na intensidade de linha de OI relativa à linha de HeI usada como referência. Aumentando a pressão de gás He de 5×10^{-3} Torr para 7×10^{-3} Torr, possibilita-se a elevação da densidade eletrônica e, mesmo com baixa densidade de oxigênio ou nitrogênio, recupera-se a condição para formação de plasma. Com alguns disparos adicionais, a intensidade da linha de impureza torna-se constante, o que evidencia o limite mínimo de quantidade de impurezas que se pode atingir com a limpeza por descarga no CECI.

Na fase de experimento descrita daqui para a frente, tentou-se fazer um estudo complementar das linhas de emissão das impurezas, tirando vantagem da boa resolução e alta iluminação do espectrômetro HR-640S. Na Figura 6.15 mostra-se o perfil de emissão da linha $4861,3 \text{ \AA}$ HI ($H\beta$) obtida na descarga do CECI. Notam-se duas diferenças fundamentais com relação à linha de HeI mostrada na Figura 6.2. A linha de HI é emitida com pouca intensidade durante a fase de preionização comparada à do HeI . O sinal correspondente a linha de HI tem um tempo de subida bem longo, cerca de $50 \mu\text{s}$ até atingir o pico, comparado ao do HeI que é praticamente imediato, quando o banco principal é ativado. Isto é indicativo de que a maioria das moléculas de hidrogênio são provenientes da parede do dispositivo, uma vez que o nível de energia superior da transição correspondente ao $H\beta$ é de 12 eV enquanto o de HeI ($5015,7 \text{ \AA}$) é de 23 eV . A linha $H\alpha$ (6563 \AA) também apresentou o mesmo comportamento que o $H\beta$.

Observou-se que a linha 4267 \AA CII ($E_n = 21 \text{ eV}$), cujo perfil temporal de emissão é mostrado na Figura 6.16 para uma descarga padrão no CECI, tem comportamento similar a linhas de hidrogênio, porém o pico ocorre $80 \mu\text{s}$ depois da energização do banco principal. Isto poderia levar à conclusão de que também os átomos de carbono vêm predominantemente da parede. O comportamento da linha 4415 \AA OII ($E_n = 26,2 \text{ eV}$) é muito semelhante ao da linha de CII .

Dobrando-se o campo toroidal B_θ , a corrente de plasma cresce cerca de 10%, aumentando o grau de ionização. A intensidade das linhas, e o nível de flutuação dos sinais aumentam. Um perfil temporal da linha 4267 \AA CII é mostrado na Figura 6.17, onde as diferenças com o caso padrão estão na emissão imediata da linha com o acionamento do banco principal e no incremento da emissão e flutuação dos sinais para o caso de B_θ maior.

6.4 MEDIDAS DE INTENSIDADE DA LINHA DE *HeII*

A medida da intensidade de uma linha do íon *HeII* é muito importante, pois ela pode fornecer informações mais precisas sobre o plasma no centro da coluna. A intensidade da emissão de linha de *HeII* indica o grau de ionização e dá uma idéia da densidade e temperatura eletrônica do plasma confinado. Além disso, flutuações destas quantidades devido a instabilidades presentes no plasma podem ser medidas através da emissão de *HeII*. Na Figura 6.18 mostra-se o perfil temporal de emissão de linha 4686 Å *HeII* ($E_n = 51$ eV), observado no CECI. Ele é bastante distinto daquele observado para a linha 3889 Å *HeI* (Figura 6.3). 1 - O tempo de subida é rápido mas o sinal é atrasado cerca de 10 μ s se comparado ao sinal de *HeI*. 2 - O sinal de *HeII* se anula e intensifica periodicamente contrastando com o sinal de *HeI* que se sustenta até o fim da descarga. 3 - A duração do sinal de *HeII* é de cerca de metade da duração do plasma. 4 - O sinal de *HeII* (20 mV de pico com 300 μ m de abertura das fendas) é extremamente reduzido quando comparado ao de *HeI* (40 mV de pico com 15 μ m de abertura das fendas).

O resultado 4 indica o baixo grau de ionização obtido no plasma do CECI. O atraso da emissão é natural pois leva um certo tempo para o aquecimento do plasma suficiente para provocar a ionização ($E_i = 24,5 \text{ eV}$) e excitação ($E_n = 51 \text{ eV}$) da linha 4686 \AA *HeII*. O nível de energia muito alto para a excitação da linha pode explicar imediatamente o resultado 3. O resultado 2 faz pressupor a presença de intensas atividades MHD no plasma do CECI. A análise precisa destas instabilidades estão sendo realizadas com uma sonda de Fourier (8). Mas o método espectroscópico poderá ser útil para a detecção de modos MHD acima de $m = 4$ que a presente versão da sonda não é capaz de realizar. Dobrando o campo toroidal B_ϕ , obteve-se o perfil temporal de *HeII* 4686 \AA mostrado na Figura 6.19. Obteve-se então o dobro de emissão e uma duração bem maior do primeiro pico. Este resultado provavelmente espelha um aumento na ionização do plasma e seu melhor controle, aliás sugerido pelo aumento substancial de corrente de plasma.

Infelizmente, no modo de operação do CECI atualmente utilizado, a linha 4686 \AA *HeII* (outras linhas de *HeII* não puderam ser detectadas) é bastante fraca, o que impediu de usá-la para a determinação de T_i pelo alargamento Doppler, pois precisou-se abrir demasiadamente a fenda (cerca de $200 \mu\text{m}$) do espectrômetro para detectá-la, o que resultou num alargamento instrumental proibitivo.

6.5 ESTUDO DA CORRELAÇÃO DOS SINAIS DE EMISSÃO DE LINHA DE *HeII*, DA DENSIDADE DE PLASMA NA BORDA $n_e(b)$, DO CAMPO TOROIDAL LOCAL $B_\phi(a)$, DO CAMPO POLOIDAL LOCAL $B_\theta(a)$ E DA CORRENTE DE PLASMA I_p

Foi realizado um estudo de correlação de sinais de vários diagnósticos implantados no CECI, com o objetivo de esclarecer o caráter das flutuações dos sinais devido a instabilidades e seus efeitos na descarga e no confinamento do plasma. Nas condições de operação padrão, os sinais de emissão de linha de *HeII* medidos com o espectrômetro, da densidade de plasma na borda $n_e(b)$ medida com sonda eletrostática, do campo toroidal local $B_\phi(a)$, do campo poloidal local $B_\theta(a)$, ambos medidos com sondas magnéticas, e da corrente de plasma I_p , são mostrados nas Figuras 6.20, 6.21 e 6.22. A posição relativa destes diagnósticos no CECI estão indicados na Figura 14. Comparando estes diversos sinais obtidos simultaneamente no mesmo disparo do CECI, pôde-se concluir que: a) Existe uma forte correlação entre a densidade de plasma $n_e(b)$ e o campo toroidal inverso gerado pelo plasma $B_\phi(a)$. b) A correlação entre $B_\phi(a)$ (invertido na tela do osciloscópio neste caso) e o campo poloidal $B_\theta(a)$ é praticamente total. Na verdade, o sinal de $B_\phi(a)$ está defasado de 180° com relação ao sinal de $B_\theta(a)$. Como

$$B_{\theta}(a') = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi a'} \quad (6.2)$$

se o raio menor do plasma a' cresce, isto é, se $B_{\theta}(a')$ cresce, o campo $B_{\theta}(a')$ diminui. c) Quanto ao sinal de emissão de $HeII$, pode-se afirmar que embora não seja total, existe uma boa correlação entre ele e os outros sinais. d) A corrente de plasma, sendo uma quantidade média e não local, não apresenta muita flutuação e não pode ser correlacionada com os sinais locais acima apresentados. As correlações identificadas poderão ser úteis para o modelamento do plasma produzido no CECI e na checagem dos modos de instabilidades detectadas pela sonda de Fourier.

A utilização de diversos diagnósticos numa só descarga permitiu observar um fenômeno interessante numa descarga não-típica, na qual a preionização não funcionou. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 6.23, 6.24 e 6.25. Nota-se que a intensidade de emissão de $HeII$ é bastante reduzida, a fuga de íons é aumentada (já que a sonda está medindo a corrente de saturação na borda), a corrente de plasma apresenta um tempo de subida bastante lento e os campos são menos intensos. Pode-se inferir então que o baixo grau de ionização do plasma é prejudicial ao confinamento do plasma no CECI. A partir desta hipótese, pode-se esperar que um aumento no grau de ionização pela utilização de aquecimento ôhmico maior com o aumento de dB_{θ}/dt , via aumento da voltagem de carga do banco principal, resultará numa melhoria significativa dos parâmetros de plasma do CECI. A única desvantagem é a possibilidade de ruptura dos isolantes da bobina poloidal quando a voltagem de carga exceder os 5 kV usados atualmente.

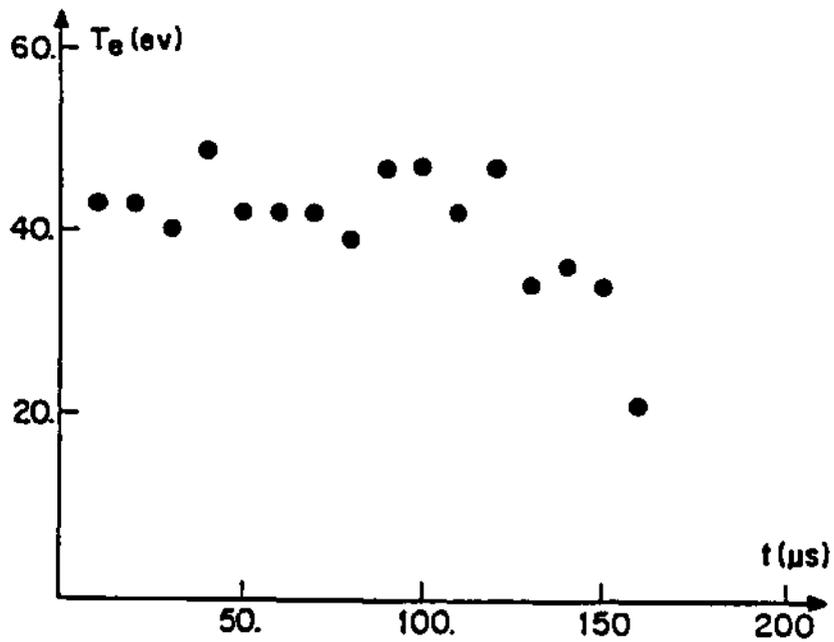


Fig. 6.13 - Perfil temporal da temperatura eletrônica no CECI usando o método da razão das linhas de *HeI*.

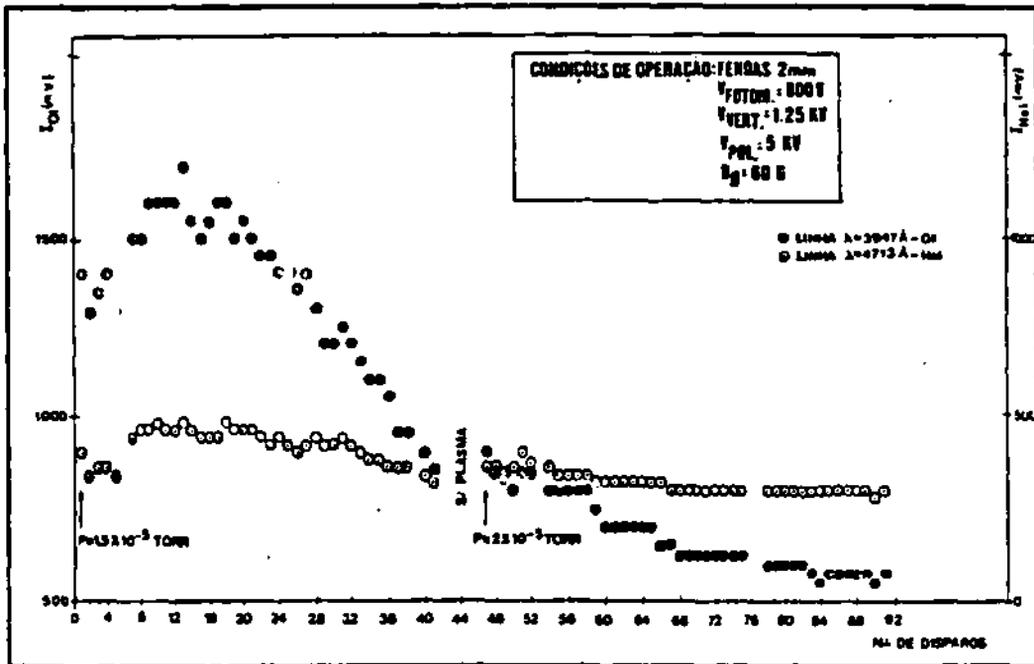


Fig. 6.14 - Gráfico das intensidades das linhas de OI e HeI versus número de disparos.

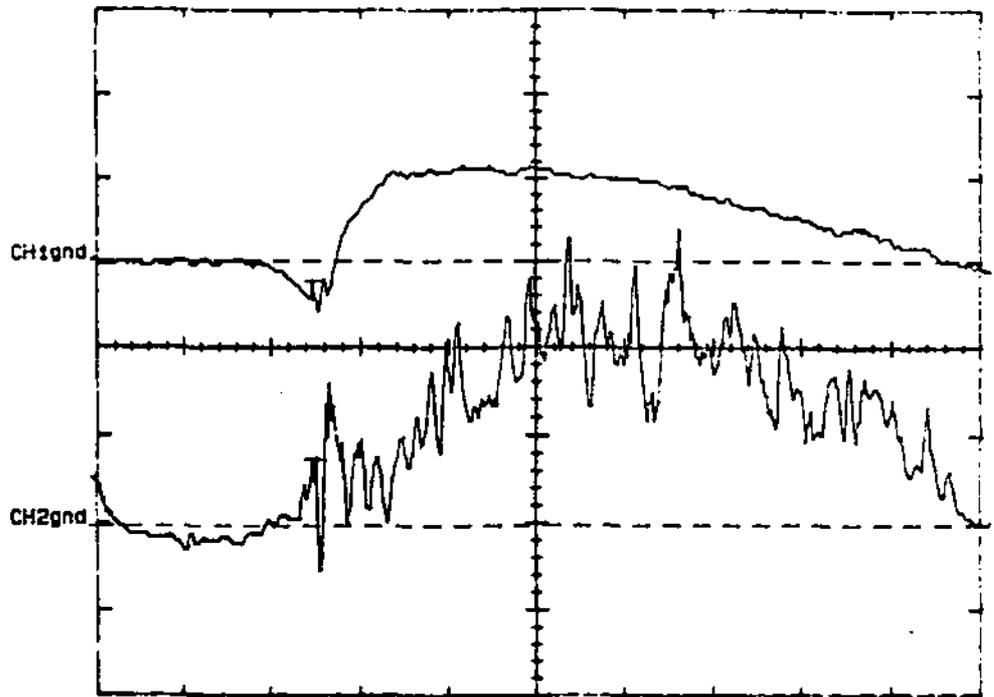


Fig. 6.15 - Intensidade da emissão da linha HI 4861,3 Å. Canal 1: corrente de plasma. Canal 2: perfil temporal de HI 4861,3 Å.

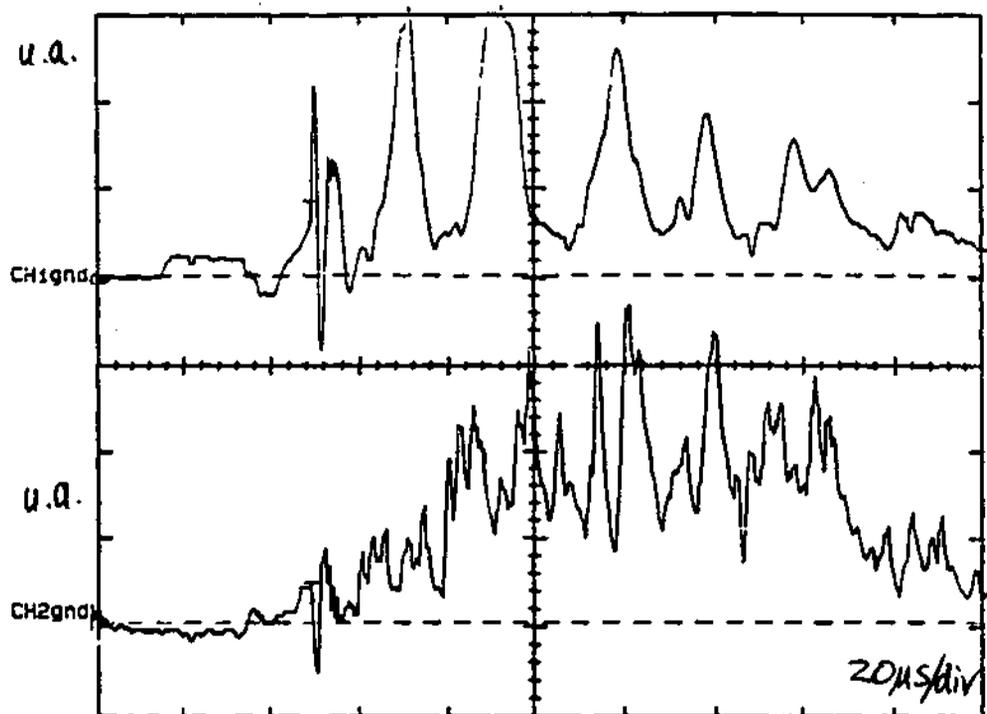


Fig. 6.16 - Abaixo: perfil temporal da emissão da linha 4267 Å CII numa descarga padrão. Acima: sinal de sonda eletrostática.

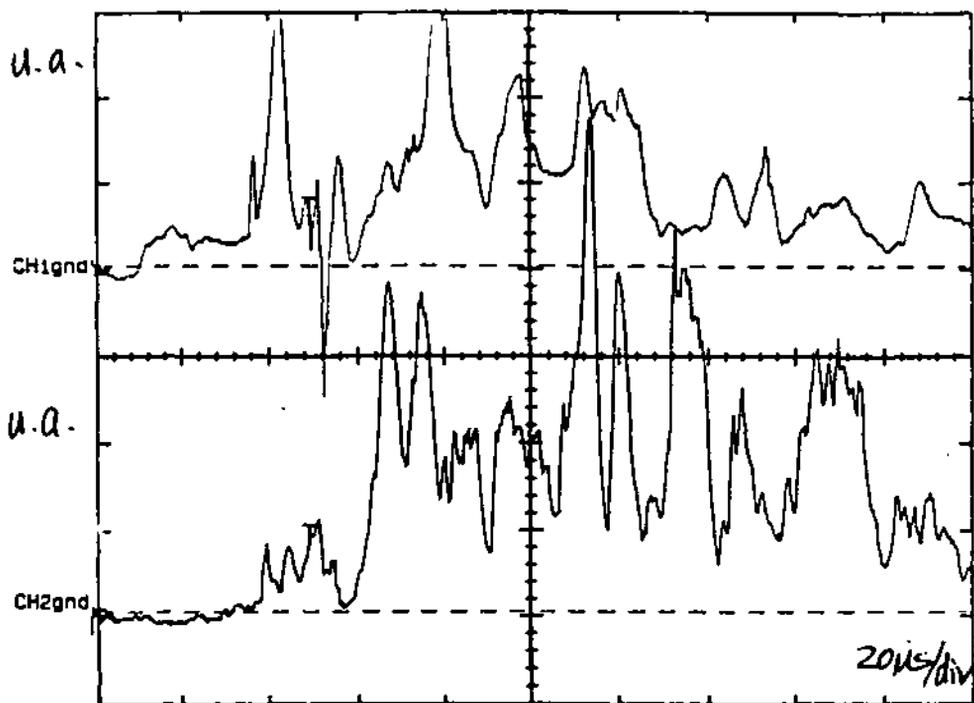


Fig. 6.17 - Abaixo: perfil temporal da emissão da linha 4267 Å CII numa descarga com $B_0 = 120$ G. Acima: sinal da sonda eletrostática.

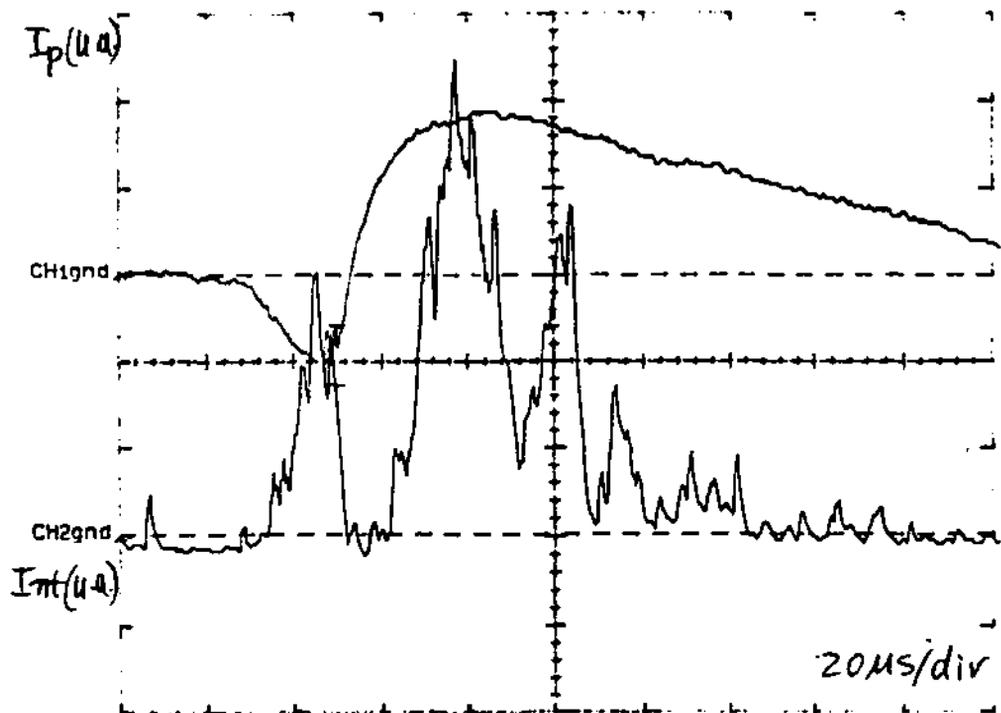


Fig. 6.18 - Intensidade da emissão da linha *HeII* 4686 Å. Canal 1: corrente de plasma. Canal 2: perfil temporal de *HeII* 4686 Å.

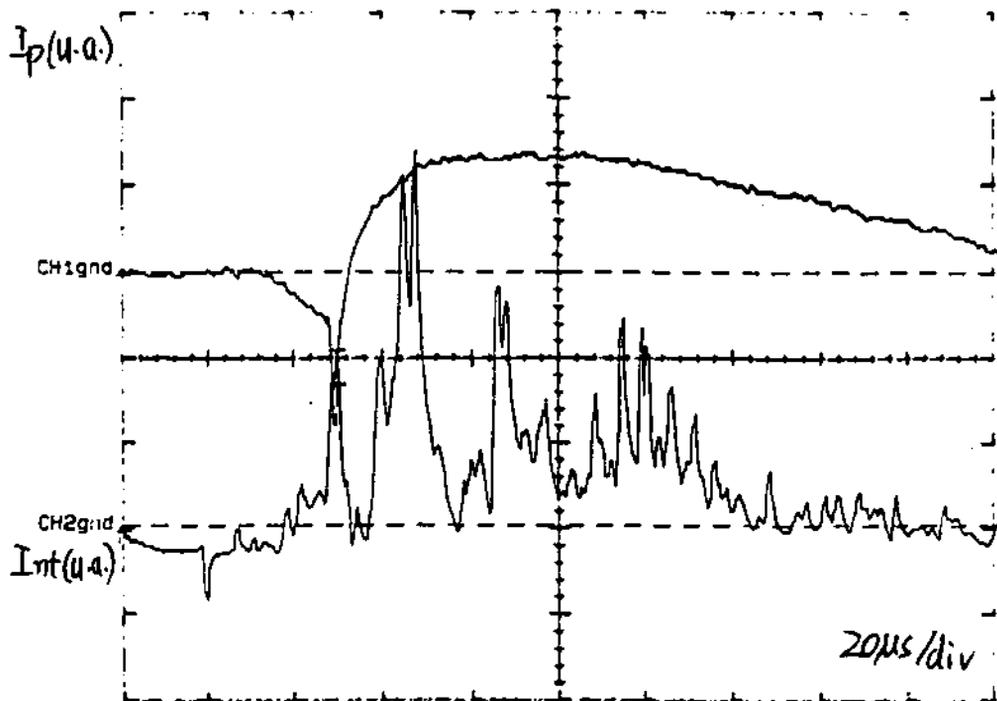


Fig. 6.19 - Intensidade da emissão da linha $HeII$ 4686 Å. Canal 1: corrente de plasma. Canal 2: perfil temporal de $HeII$ 4686 Å.

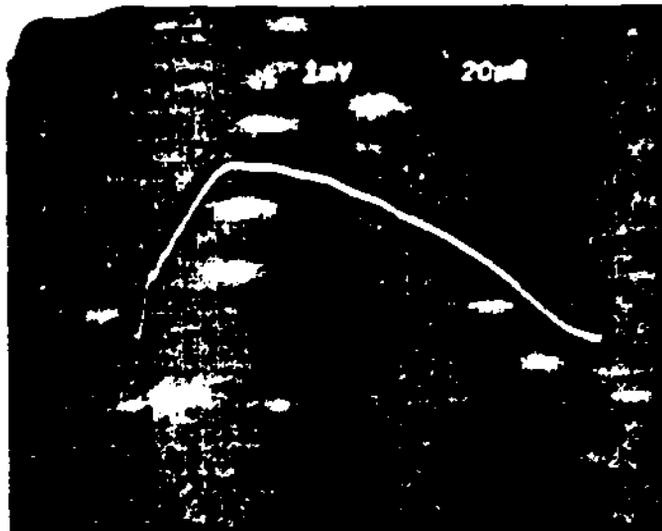


Fig. 6.20 - Correlação de sinais para descarga padrão. Perfil da corrente de plasma.

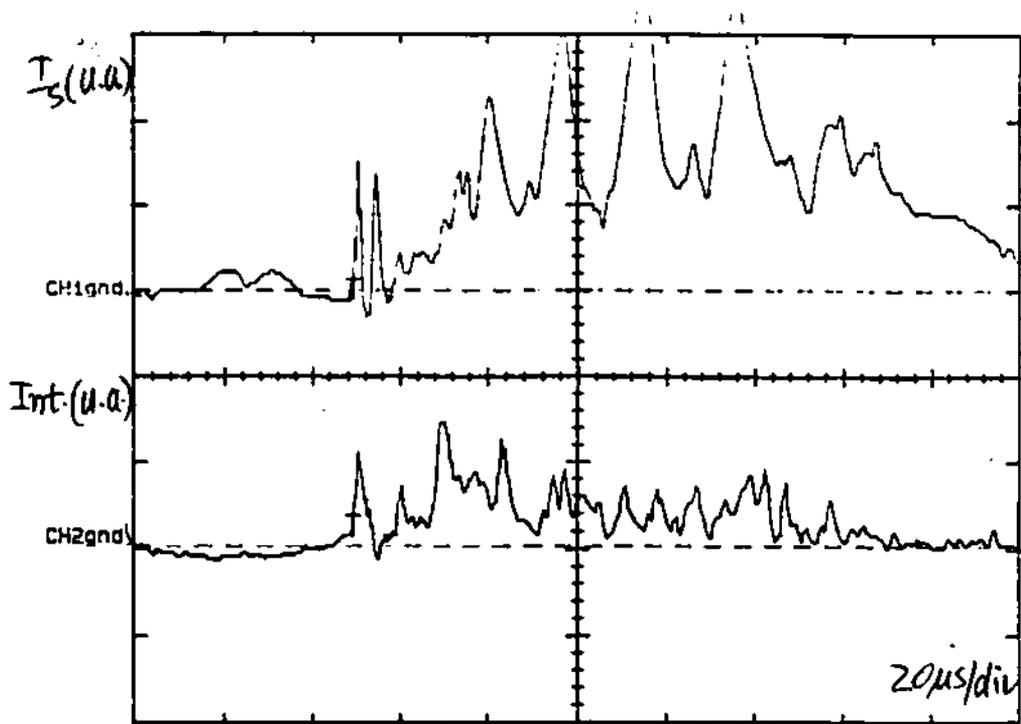


Fig. 6.21 - Correlação de sinais. Canal 1: sinal da sonda eletrostática. Canal 2: sinal da emissão de HeII.

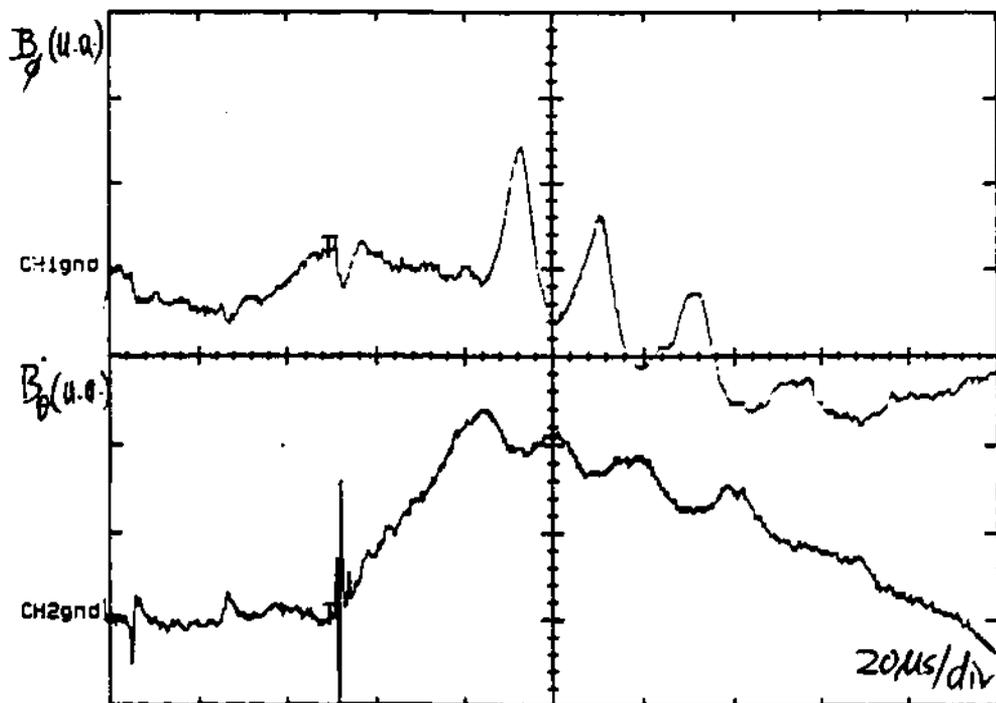


Fig. 6.22 - Correlação de sinais. Canal 1: sinal de $B_\phi(a)$. Canal 2: sinal de $B_\phi(a)$.

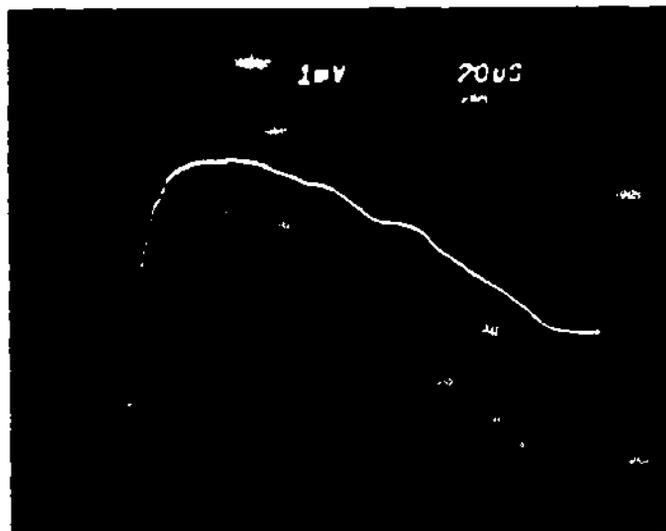


Fig. 6.23 - Correlação de sinais, caso sem preionização . Perfil da corrente de plasma.

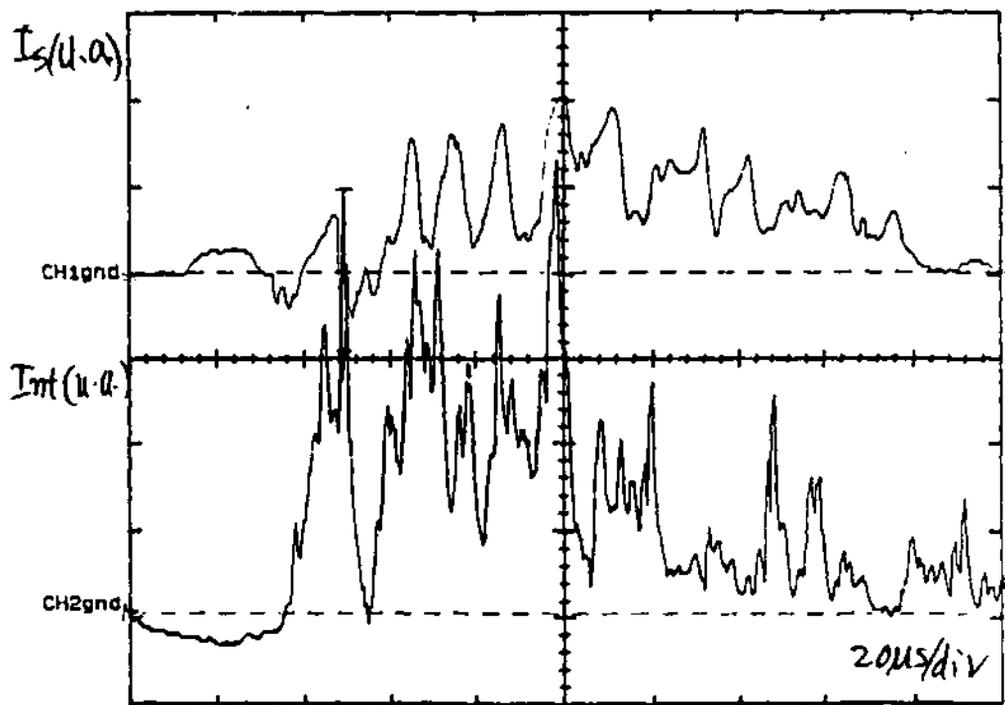


Fig. 6.24 - Correlação de sinais. Canal 1: sinal da sonda eletrostática. Canal 2: sinal da emissão de HeII.

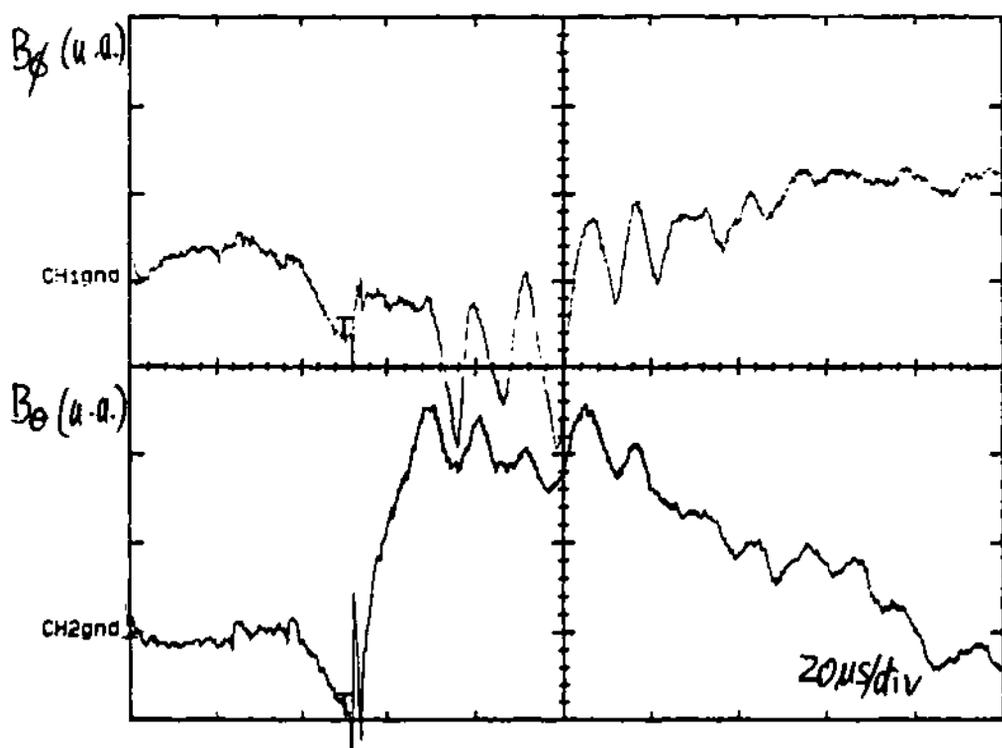


Fig. 6.25 - Correlação de sinais. Canal 1: sinal de $B_\phi(a)$. Canal 2: sinal de $B_\theta(a)$.

CAPÍTULO 7

DISCUSSÃO

Para a determinação da temperatura dos íons do plasma produzido no CECI, considera-se que esta temperatura é basicamente igual à temperatura das partículas neutras de hélio (gás de trabalho) ou do hidrogênio que comparece como impureza no plasma. Precisou-se usar este artifício porque a linha de $HeII$, geralmente utilizada para esta finalidade, apresenta uma intensidade muito reduzida no CECI. O tempo de termalização entre He^+ e He^0 ou H^0 nas condições experimentais é bastante curto, menor que $1 \mu s$ e, portanto, a hipótese da semelhança da temperatura entre eles é válida. Um aumento da temperatura de íons (dos atuais 3 eV para mais de 30 eV), no plasma do dispositivo CECI é desejável, uma vez que isto acarretaria uma maior facilidade da sua medida. Maiores temperaturas iônicas implicariam em maiores alargamentos das linhas de emissão e em maiores intensidades das linhas, conseqüentemente permitiria a utilização de abertura de fendas menores e varreduras bem maiores, o que facilitaria a observação do alargamento da linha de $HeII$ fornecendo um valor mais direto da temperatura iônica.

A temperatura de elétrons obtida espectroscopicamente neste experimento precisa ser analisada com muito cuidado. O alto valor de 40 eV, mesmo considerando o erro experimental antecipado de 30%, não é muito consistente com a temperatura iônica de menos de 5 eV determinada espectroscopicamente. De fato, usando a técnica de sonda eletrostática, obteve-se um T_e de cerca de 10 eV, embora este método implique em inserir uma sonda dentro do plasma, que pode perturbá-lo. Além disso, a sonda foi usada para medir o plasma da borda e não do centro da coluna.

Usando a equação do balanço de pressão:

$$B_{\theta} = \frac{4\pi R}{\mu_0 I_p} - \ln \frac{8R}{a} + 1 \quad (7.1)$$

com os valores de parâmetros de uma descarga padrão de $B_{\perp} = 27 \text{ G}$, $I_p = 1200 \text{ A}$, $R = 0,12 \text{ m}$, $a = 0,04 \text{ m}$, pode-se obter:

$$n_e [\text{cm}^{-3}] T [\text{eV}] = 4,65 \times 10^{13}, \quad (7.2)$$

onde $T = T_i + T_e$.

Por outro lado, uma relação entre n_e e T_e pode ser obtida pela medida da sonda dupla (sonda eletrostática). A expressão da corrente de saturação para esta sonda é:

$$i_o = \frac{1}{\sqrt{e}} q n_e \left(\frac{kT_e}{M_i} \right)^{1/2}, \quad (7.3)$$

onde $e = 2.71828$. Substituindo os valores numéricos obtém-se:

$$n_e [\text{cm}^{-3}] = 2.1 \times 10^{13} \frac{i_o [\text{A/cm}^2]}{\sqrt{T_e (\text{eV})}} \quad (7.4)$$

É possível, então, obter o gráfico da Figura 7.1, onde a curva 1 é obtida a partir da Equação 7.4 e a curva 2, da Equação 7.2. Da curva 1 obtém-se uma densidade de cerca de $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ para uma temperatura eletrônica de 10 eV. Para esta densidade, a curva 2 fornece $T = 7 \text{ eV}$. Mas o erro na determinação de T pela curva 2 é da ordem de 50%, enquanto o erro na determinação de T_e a partir da curva 1 é de cerca de 20%. Portanto, uma temperatura eletrônica de 10 eV e uma temperatura de íons de 3 eV são consistentes com a medida de T_e por sonda eletrostática e a medida de T_i por espectroscopia, para uma densidade de cerca de $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. A discrepância da temperatura eletrônica por espectroscopia e pela sonda com o suporte da estimativa pelo balanço de pressão ocorre, provavelmente, devido ao baixo grau de ionização do plasma no CECI. Levando em conta que a pressão de trabalho com gás He usado num disparo padrão no CECI é $6,7 \times 10^{-3} \text{ Torr}$ (valor real), a densidade de neutros é de $n_o = 2,4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Tomando o valor de

pico para a densidade, obtêm-se somente 3,5% de ionização . Portanto, as colisões ions-partículas neutras acabam prevalecendo e o modelo de corona que é a base do método da razão das intensidades se torna inválido. A partir deste resultado, pode-se programar um experimento a ser realizado no CECI que possibilita checar a validade do método da razão das intensidades para linhas de HeI, com a variação do grau de ionização do plasma.

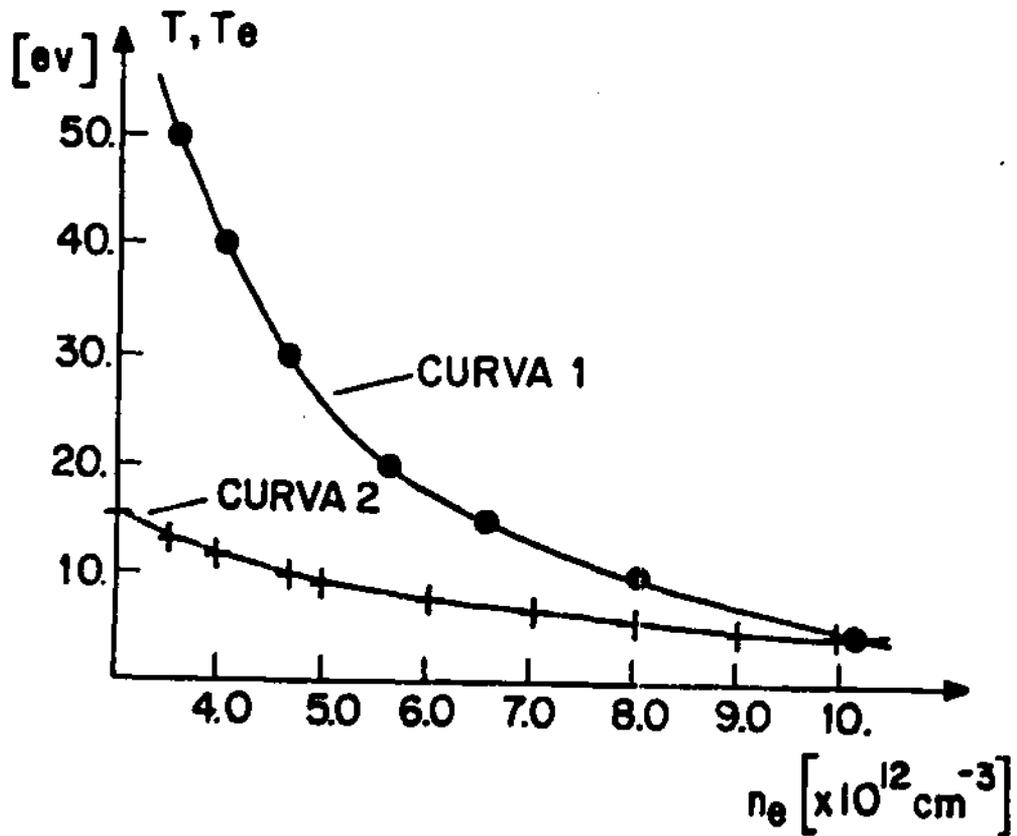


Fig. 7.1 - Gráfico da temperatura do plasma versus densidade do plasma.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

O espectrômetro HR-640S financiado pela FAPESP foi alinhado com grande precisão, atingindo uma resolução máxima de $0,3 \text{ \AA}$ quando uma fotomultiplicadora "side-on" IP28 é usada como detetor e uma abertura de fenda de entrada de $15 \mu\text{m}$ e de saída de $10 \mu\text{m}$, com uma altura de 1 mm , é usada. Dispõe-se, portanto, de uma ferramenta poderosa que pode ser usada para diagnosticar plasma de alta temperatura sem perturbá-lo.

No dispositivo de plasma CECI do tipo RFP operado no LAP/INPE, este espectrômetro foi utilizado para medir a temperatura iônica pelo alargamento Doppler das linhas de emissão fornecendo cerca de 3 eV . A temperatura eletrônica de cerca de 40 eV obtida pelo método da razão das intensidades das linhas de $HeII$, medidas com o mesmo equipamento, não é compatível nem com a temperatura iônica nem com o valor de cerca de 10 eV obtida com uma sonda eletrostática. Entretanto, os valores medidos de $T_i = 3 \text{ eV}$ e $T_e = 10 \text{ eV}$ são compatíveis com a medida da temperatura inferida da corrente de saturação de íons e também com a do balanço de pressão no CECI, quando uma densidade de $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ é considerada. O grau de ionização do plasma de cerca de $3,5\%$ é bastante baixo e decorre de sua baixa temperatura. Provavelmente, com o aumento da temperatura do plasma e, em consequência, com o aumento do grau de ionização, o método da razão das intensidades deverá fornecer um valor mais compatível de T_e .

As medidas das impurezas forneceram dados interessantes que indicam o fluxo de H , C e O das paredes do dispositivo. Um estudo de transporte destes elementos seria de grande interesse, mas requer medidas com resolução espacial. Estas medidas serão realizadas na próxima fase de experimentos do CECI.

As correlações das flutuações dos sinais de emissão de linha de $HeII$, da densidade de plasma na borda $n_e(b)$, do campo toroidal local $B_\theta(a)$, do campo poloidal local $B_\phi(a)$ e da corrente de plasma denunciam a existência de violentas instabilidades no CECI durante toda a descarga. Uma medida de grande interesse para o campo de confinamento de plasma por configuração RFP é a determinação da velocidade de propagação da instabilidade na direção toroidal. Isto pode ser efetuado com sondas magnéticas já instaladas na direção toroidal do CECI, com o suporte das medidas espectroscópicas e sondas eletrostáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Aso, Y.; Galvão, R.M.O.; Ueda, M. Design, construction and operation of a small RFP for turbulent plasma studies. **Proceedings of the Energy Independence Conference on Fusion Energy and Plasma Physics**. Sakanaka, P.H., ed., World Scientific, 1988, p. 122-132.
- (2) Bodin, H.A.B.; Newton, A.A. Reversed-Field-Pinch Research. *Nuclear Fusion*, **20** (10): 1255-1324, 1980.
- (3) McWhirter, R.W.P. Spectral Intensities. In Huddleston, R.H. and Leonard, S.L., ed. **Plasma Diagnostic Techniques**. New York, Academic Press, 1965. cap. 5, p. 201-264.
- (4) Aso, Y. Sonda eletrostática no CECI. INPE - São José dos Campos, dez. 1990. Comunicação pessoal.
- (5) Equipe TFR. Line Radiation in the Visible and in the Ultraviolet in TFR Tokamak Plasmas. *Nuclear Fusion*, **15**: 1053-1066, 1975.
- (6) Breton, C.; De Michelis, C.; Mattioli, M. Radiation Losses From Oxygen and Iron Impurities in a High-Temperature Plasma. *Nuclear Fusion*, **16** (6): 891-899, 1976.
- (7) Prado, F.; Ueda, M.; Aso, Y. Diagnósticos por espectroscopia ótica no dispositivo CECI. Apresentado no XI Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Ciência e na Indústria, IFUSP, S.P., 24-26 de julho, 1990.
- (8) Rosal, A.C.; Aso, Y.; Ueda, M. Estudo de Instabilidades MHD no Dispositivo de Plasma CECI com utilização de Sondas de Fourier. Apresentado no XI Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Ciência e na Indústria, IFUSP, S.P., 24-26 de julho, 1990.

APÊNDICE A

ANÁLISE DE DADOS

As medidas foram realizadas através de um osciloscópio digital adaptado a uma impressora gráfica que pode fornecer uma cópia dos sinais coletados. Os sinais detectados pela fotomultiplicadora mostraram sensível variação de descarga. Portanto, para uma análise mais precisa dos dados, os sinais medidos foram inicialmente digitalizados. O procedimento para esta digitalização e o processamento dos dados são dados a seguir.

A.1 Digitalização

A digitalização dos sinais foi realizada através de uma mesa digitalizadora de alta resolução (200 pontos/polegada). Esta é conectada a um microcomputador, comunicando-se através de uma porta serial. Suas características são mostradas na Tabela A.1.

Os dados digitalizados são lidos na porta serial através da rotina do ROM BIOS de número de interrupção 14 (hexadecimal). Para isso, são emitidos à rotina através dos registradores AH e DX os respectivos valores 02 (hexadecimal) e 01. O valor de retorno de interesse, o caractere na porta, está no registro AL. Um programa foi desenvolvido para realizar esta operação. Um diagrama de blocos do programa é mostrado na Figura A.1. O protocolo de comunicação possibilita a leitura das coordenadas absolutas da mesa digitalizadora. Neste programa, uma rotina gráfica deteta o modo gráfico em uso (VGA, EGA, CGA ou Hercules) e a curva digitalizada é automaticamente transferida para a tela do monitor. Os dados são salvos em um arquivo de dados (digit.dat) em formato ASCII. Uma rotina de

Tabela A.1 - Características da mesa digitalizadora

Emulação	Calcomp 2000
Formato dos dados	ASCII
Taxa de comunicação	1200 "baud"
Resolução	200 pontos/pol
Paridade	0
Bits de dados	8
Coordenadas	absoluta

interface de BIOS realiza a leitura do teclado para a finalização do programa.

Durante a digitalização de um sinal, o intervalo de "sampling" pode não ser constante. Isto é sistematicamente corrigido por interpolação linear entre dois pontos de "sampling".

Os sinais digitalizados fornecem 1410 pontos para o intervalo de tempo de 200 μ s em que as medidas foram realizadas, mostrando ótima reprodutividade aos sinais originais.

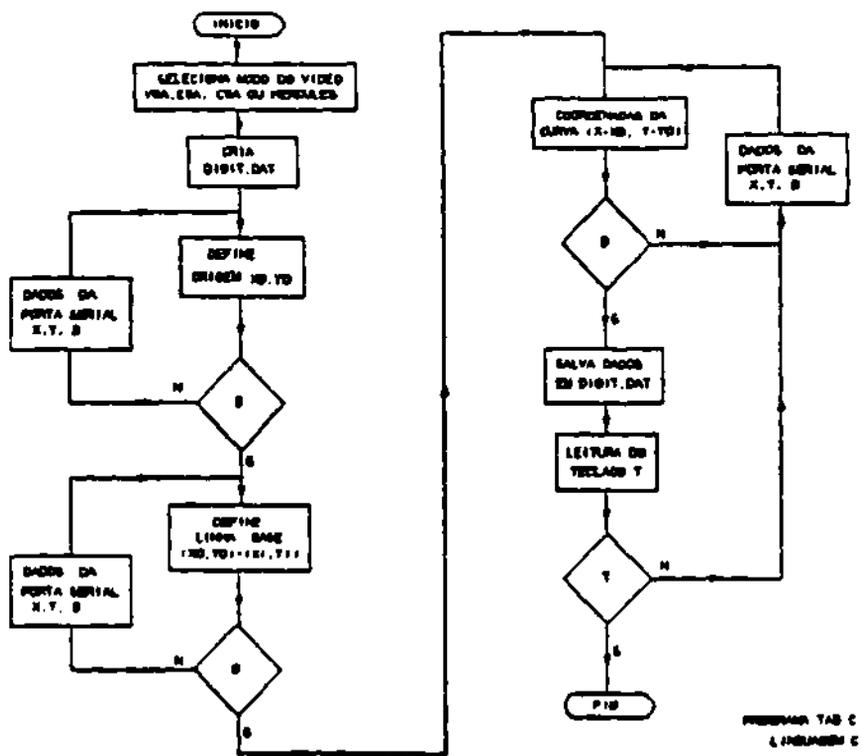


Fig. A.1 - Diagrama de blocos do programa de digitalização .

A.2 Processamento dos sinais de medida

O processamento de sinais envolve a análise estatística, os ajustes dos pontos experimentais a um perfil dado por uma função conhecida e os cálculos de convolução dos sinais. Deste processo, a temperatura dos íons pode ser finalmente calculada. Um diagrama de blocos deste procedimento é mostrado na Figura A.2.

A linha analisada foi a linha do hidrogênio 4861.3 Å. Foram realizadas medidas em quinze diferentes comprimentos de onda em torno do valor central. Uma média de cinco medidas foram realizadas para uma mesma condição experimental. O cálculo do valor médio e o desvio padrão dos sinais para cada condição foram realizados numa planilha de cálculo. A curva mostrada na Figura A.3 ilustra o resultado com o valor médio do sinal (linha cheia) somado e subtraído do desvio padrão (linhas pontilhadas). Pulsos de alta frequência, de natureza não totalmente esclarecida, estão presentes em todos os sinais medidos.

Considere-se agora que o perfil da linha medida possa ser descrita por uma função $f(x)$. Se $g(x)$ e $h(x)$ representam, respectivamente, o perfil real da linha e o do aparato de medida, então $f(x)$ é dado por:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x)h(x-y)dy. \quad (\text{A.1})$$

Para o caso em que $g(x)$ e $h(x)$ são representados por seus respectivos valores discretos, g_j e h_k , e considerando que h é diferente de zero apenas num intervalo $-M/2 < k < M/2$, a Equação A.1 pode ser reescrita na forma:

$$f_j = \sum_{k=M/2+1}^{M/2} g_{j-k}h_k. \quad (\text{A.2})$$

Pode ser demonstrado pela relação de convolução dada pela Equação A.1 que, se o perfil real e instrumental forem gaussiano, o resultado da convolução também será gaussiano. Isto representa o caso aqui abordado. O alargamento da linha espectral em questão é essencialmente dominado pelo efeito Doppler; assim, a linha assume uma forma gaussiana. Observou-se que o alargamento instrumental, dominado essencialmente pelo espectrômetro, é bem próximo a uma gaussiana. Portanto, o perfil da linha espectral medida terá a forma:

$$f(x) = Ae^{-Bx^2}, \quad (\text{A.3})$$

onde A e B são constantes.

Um programa foi escrito (`gsfit.for`) para realizar o ajuste por mínimos quadrados de pontos experimentais com funções não-lineares em relação a seus parâmetros. O ajuste foi realizado utilizando a Equação A.3 adicionada a um contínuo e um deslocamento. Um típico resultado obtido é mostrado na Figura 6.7 para o instante $t = 120.3 \mu\text{s}$.

A última etapa do processamento é a determinação do perfil real da linha. Nota-se pela Equação A.1 que, para obter este perfil, deve-se realizar a operação inversa da convolução (deconvolução). Essa operação pode ser simplificada quando se trabalha no espaço do momento \vec{k} . Se $G(k)$, $H(k)$ e $F(k)$ são respectivamente as transformadas de Fourier de $g(x)$, $h(x)$ e $f(x)$, a Equação A.1 pode ser reescrita:

$$F(k) = G(k)H(k). \quad (\text{A.4})$$

Logo, para o caso da convolução o caso se reduz a uma multiplicação e para a deconvolução, a uma divisão. Este método foi utilizado para esta análise.

Um programa foi desenvolvido (`cvl.for`) para realizar a convolução e a deconvolução por Transformada de Fourier Rápida (Fast Fourier Transform). O método foi comparado com o método da integração (eq. (A.1)); a largura total a meia intensidade da convolução de duas gaussianas varia entre os dois métodos em 1%, precisão suficiente para a presente análise.

Para a deconvolução foi tomada então a largura total da gaussiana obtida pelo ajuste e para o instrumento, uma gaussiana de largura $0,50 \text{ \AA}$. Foi então obtida a largura real da linha espectral para os diversos instantes da descarga. Tendo-se esta largura real, a temperatura dos íons no plasma foi finalmente determinada. A evolução da temperatura nos diversos instantes do confinamento é mostrado na Figura 6.9.

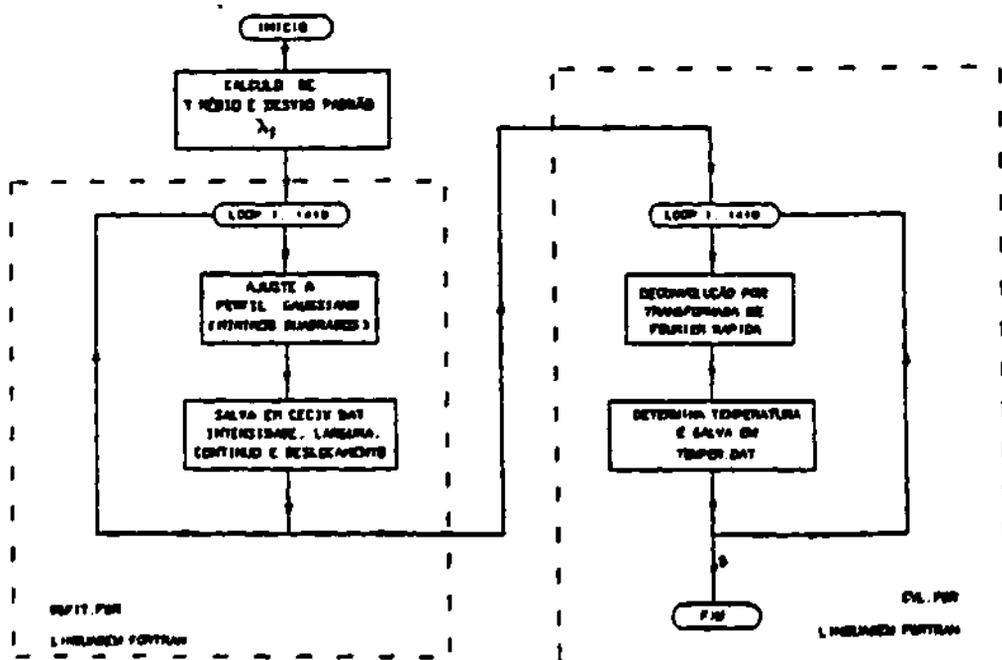


Fig. A.2 - Diagrama de blocos para processamento de dados.

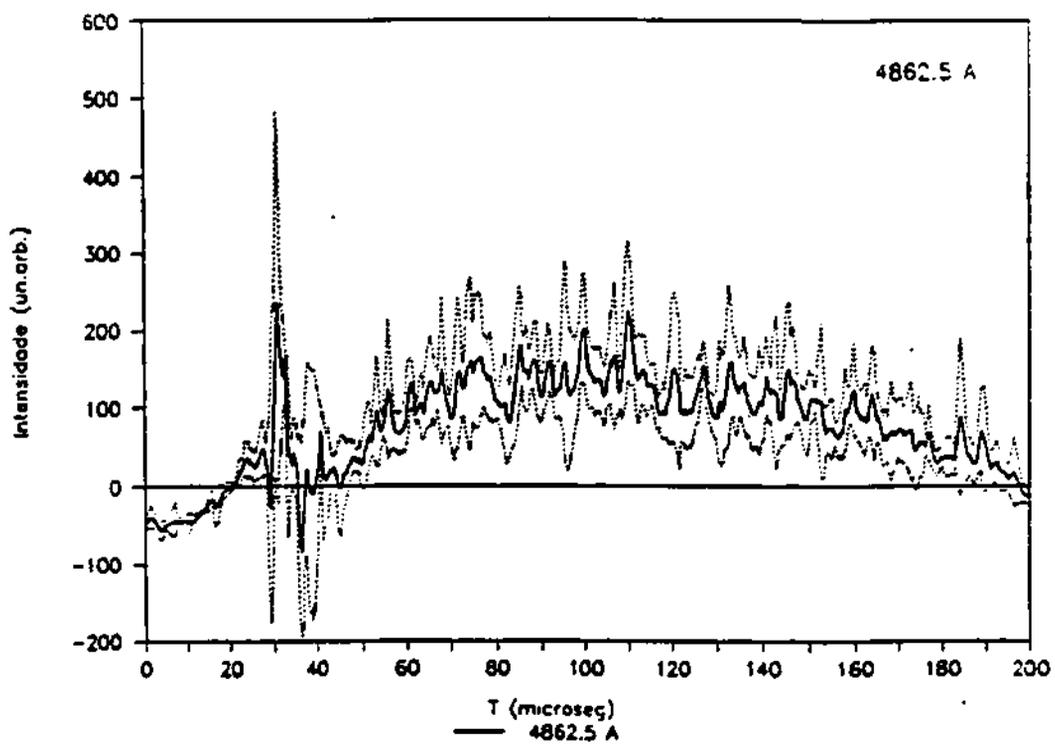


Fig. A.3 - Perfis dos sinais de emissão da linha 4861 Å HI digitalizados.

**PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS
EDITADAS PELO INPE**

RELATÓRIOS DE PESQUISA

- Reportam resultados de pesquisa tanto de natureza técnica quanto científica.

NOTAS TÉCNICO-CIENTÍFICAS

- Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, software, sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados e atlas, e documentação de projetos de engenharia.

MANUAIS TÉCNICOS

- Descrevem normas, procedimentos, instruções e orientações.

PUBLICAÇÕES DIDÁTICAS

- Apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

TESES E DISSERTAÇÕES

- Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

PUBLICAÇÕES SERIADAS

- Periódicos Técnico-científicos: Boletim de Sensoriamento Remoto, Climanálise: Boletim de Monitoramento e Análise Climática.
- Anais de Eventos