

for 9/27/337

INPE -- 4862 | 89.

PALAVRAS CHAVES / KEY WORDS

AUTORES / AUTHORS
 Toróide Compacto Diagnóstico de Plasmas
 Plasma Espectroscopia
 Fusão Termonuclear Sondas

AUTORIZADO POR / AUTHORIZED BY

X. Ludwig
 Gerson Otto Ludwig
 Chefe do LAP

AUTOR RESPONSÁVEL / RESPONSIBLE AUTHOR

Mario Ueda
 Mario Ueda

DISTRIBUIÇÃO / DISTRIBUTION

INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY

José Osvaldo Rossi
 José Osvaldo Rossi

COU/UDC

533.9

DATA / DATE

Agosto 1989

PUBLICAÇÃO Nº / PUBLICATION NO
 INPE-4862-RPE/593

TÍTULO / TITLE
 DIAGNÓSTICOS DE PLASMA GERADO NO TORÓIDE
 COMPACTO DA UNICAMP

AUTORES / AUTHORSHIP
 Mario Ueda*
 Yoshiaki Doi**
 Emília Akemi Aramaki***
 Roberto Yzumi Honda****
 Peterson Porto*****
 Luiz Berni*****
 Mnnemasa Machida*****

ORIGEM / ORIGIN

LAP

PROJETO / PROJECT

PMAG

Nº DE PAG / NO OF PAGES

44

ÚLTIMA PAG / LAST PAGE

35

VERSÃO / VERSION

Nº DE MAPAS / NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Este trabalho que descreve os experimentos realizados no Toróide Compacto TC-1 da UNICAMP está dividido em três partes: 1) resumo das características da máquina TC-1 e modos de sua operação; 2) descrição de diagnósticos utilizados e em programação; 3) resultados experimentais mais recentes usando diagnósticos óticos e eletromagnéticos.

BB 0081.7
 PEDIDO 043.443

OBSERVAÇÕES / REMARKS

* Instituto de Pesquisas Espaciais
 ** Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP
 *** Faculdade de Engenharia Elétrica de Guaratinguetá - UNESP
 **** Instituto de Física da UFF
 ***** Instituto de Física da UNICAMP

ABSTRACT

This paper which describes experiments carried out in the Compact Torus of UNICAMP (TC-1) is divided into 3 parts: 1) summary of TC-1 characteristics and its operation mode; 2) description of diagnostics in use and ones to be installed; 3) recent experimental results using optical and electromagnetic diagnostics.



SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	viii
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - CARACTERIZAÇÃO DA MÁQUINA TC-1	4
3 - MODO DE OPERAÇÃO DO TC-1	10
4 - DIAGNÓSTICOS UTILIZADOS	14
4.1 - SONDAS DE ROGOWSKI	15
4.2 - SONDA MAGNÉTICA INTERNA	15
4.3 - SONDA MAGNÉTICA EXTERNA LOCAL E DE ENLACE	17
4.4 - SONDA COPO DE FARADAY	20
4.5 - ESPECTROSCOPIA NO VISÍVEL	22
4.6 - DIAGNÓSTICO COM FOTODIODO DA RADIAÇÃO BREMSSTHRALUNG	23
4.7 - FOTOGRAFIAS ULTRA-RÁPIDAS COM IMACON	24
5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	24
6 - TRABALHOS FUTUROS	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Sequência de formação de um FRC	2
2 - Vista esquemática do experimento TC-1	7
3 - Circuito equivalente dos bancos de capacitores (principal, polarização e pré-ionização)	8
4 - Desenho esquemático da chave do tipo distorção de campo com "crow-bar"	9
5 - Sinais obtidos pelas sondas magnéticas nas bobinas do TC-1 com e sem "crow-bar"	11
6 - Sequência temporal de uma descarga típica de um FRC com "crow-bar" no banco principal	13
7 - Sistema de calibração, construção e um sinal típico da sonda Rogowski instalado em uma das seções do solenóide principal	16
8 - Montagem e sinais típicos de uma sonda magnética interna e local externa	18
9 - Montagem e sinal típico de uma sonda de fluxo excluído	19
10 - Montagem esquemática da sonda copo de Faraday e um sinal típico da sonda	21
11 - Sinais obtidos com o espectrômetro centrado na linha He II e fotodiodo na radiação visível para descargas do TC-1 com diferentes pressões de base	26
12 - Curvas de intensidade versus pressão de operação obtidas através de medidas com copo de Faraday, fotodiodo e espectrômetro. Todos os pontos foram obtidos para um tempo fixo de 3 μ s após a descarga do banco principal	27
13 - O efeito do intervalo de tempo Δt (tempo entre o término da descarga do banco de pré-ionização e início da descarga do banco principal) para emissão da linha de He II	29
14 - Curva de alargamento Doppler da linha de He II (4686 Å) para a determinação da temperatura de íons do plasma. A temperatura obtida é de 70 eV	30
15 - Fotografias ultra-rápidas obtidas com IMACON no modo STREAK para diferentes pressões de operação com gás hélio. As setas indicam o início da descarga do banco principal	31

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1 - Parâmetros dos bancos de capacitores utilizados no TC-1	5

1 - INTRODUÇÃO

Vários tipos de dispositivos que usam o campo magnético para confinar um plasma de alta densidade e temperatura têm sido usado para estudar a viabilidade da fusão termonuclear controlada. O Toróide Compacto é um destes tipos de dispositivos de confinamento de plasma cuja característica principal é a ausência de bobinas magnéticas que passam pelo centro do toróide, o que facilita a sua construção e manutenção. Nesta configuração, um Toróide Compacto não contém campo toroidal. O dispositivo "Field Reversed Configuration" (FRC) faz parte desta família dos Toróides Compactos e é chamada também na literatura de "Field Reversed Theta Pinch" devido ao modo de formação de seu plasma. A sequência de formação do FRC está mostrada de uma maneira simplificada na Fig. 1. Plasmas com alto beta e tempo de vida $> 100 \mu s$ tem sido obtidos em dispositivos FRC.

A máquina TC-1 (Machida et al., 1984; Machida et al., 1988) do tipo Field Reversed Configuration (FRC) foi montada no Laboratório de Plasma da UNICAMP, com o seu projeto acompanhando as recentes tendências internacionais nessa área de pesquisa. A construção do TC-1 foi iniciada em 1984 começando com materiais básicos obtidos sob empréstimo de Los Alamos National Laboratories dos USA. A montagem do TC-1 foi completada em 1986 e a máquina entrou na sua primeira fase de operação em 1987.

Durante o período de construção, várias inovações foram introduzidas em relação ao projeto TC-1-1ª fase (primeiro projeto), principalmente decorrentes das informações colhidas por um dos autores durante as visitas efetuadas à Nihon University do Japão, e idéias resultantes das discussões com especialistas nesta área.

Neste trabalho que descreve o TC-1-2ª fase, iremos expor os detalhes da máquina incluindo as modificações efetuadas na máquina e alguns dados experimentais preliminares que foram obtidos durante este ano. Este trabalho é dividido da seguinte forma: Na seção 2 descrevemos os parâmetros do TC-1 e os circuitos mais importantes do projeto; na se

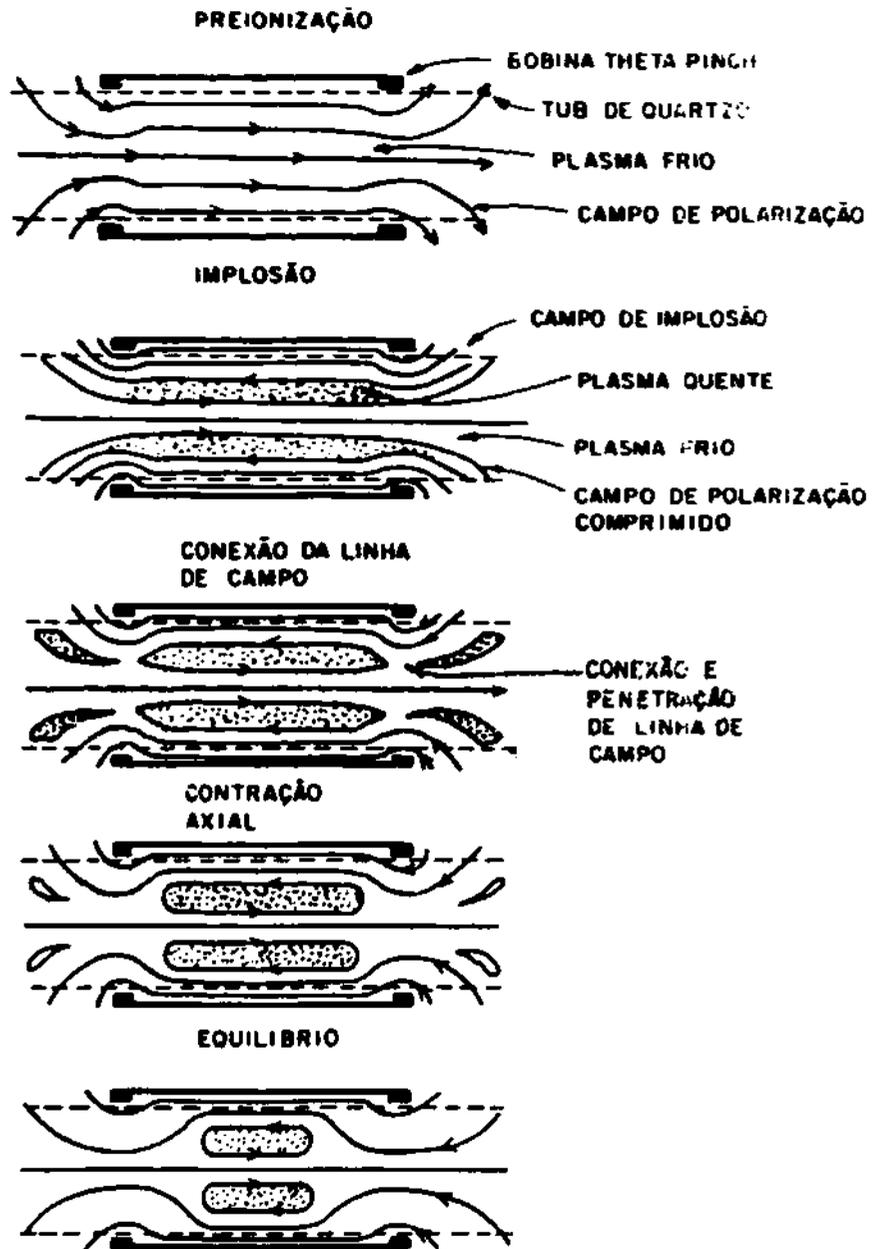


Fig. 1 - Sequência de formação de um FRC.

FONTE: Dolan (1982).

ção 3 descrevemos os modos de operação da máquina; na seção 4 os diagnósticos em uso e os que estão planejados são detalhados e na seção 5 apresentamos os resultados mais recentes obtidos no TC-1. Finalmente na seção 6 discutimos os trabalhos futuros propostos.

2 - CARACTERIZAÇÃO DA MÁQUINA TC-1

Várias modificações foram feitas na máquina TC-1 no que diz respeito à energia armazenada no sistema, devido principalmente à troca de capacitores e fontes de alta tensão para os de maiores energias e tensões, comparados aos usados na 1ª fase em 84.

Atualmente o sistema elétrico do TC-1 é composto de 3 bancos de capacitores que estão em operação rotineira e de um banco em fase de testes. As características principais dos bancos estão expostos na Tab. 1.

TABELA 1

	Banco Principal (em operação)	Banco de Ionização (em operação)	Banco de Polarização (em operação)	Banco p/ Div. Magn. (operacional)
C (capacitância)	28,0 μ F (15 cap. de 1,8 μ F)	1,6 μ F (2 cap. de 0,8 μ F)	440,0 μ F (8 cap. de 55,0 μ F)	7,4 μ F (4 cap. de 1,9 μ F)
V (voltagem de carga)	Nom. 70 kV Oper. 25 kV	Nom. 70 kV Oper. 25 kV	Nom. 10 kV Oper. 2 kV	Nom. 25 kV Oper. 20 kV
E (energia armazenada)	8,8 kJ	0,5 kJ	0,9 kJ	1,5 kJ
L (indutância)	280,0 nH	870,0 nH	1,1 nH	520,0 nH
B (campo mag. gerado)	5,6 kG	0,4 kG	0,5 kG	5,0 kG (estimado)
s (tempo de subida)	5 μ s	2 μ s	40 μ s	3 μ s (estimado)

Parâmetros dos bancos de capacitores utilizados no TC-1

Em relação aos outros parâmetros, tais como tamanho do solenóide, sistema de radiofrequência e sistema de vácuo, foram mantidos os mesmos valores anteriores a saber:

- SOLENÓIDE

comprimento do solenóide	$l = 65 \text{ cm}$
diâmetro interno do solenóide	$\phi_i = 16 \text{ cm}$
diâmetro do espelho magnético	$\phi_e = 15 \text{ cm}$
diâmetro do tubo de pirex	$\phi_p = 14 \text{ cm}$
indutância do solenóide	$L_0 = 35 \text{ nH}$

- RADIOFREQUÊNCIA:

35 MHz

100 W

- SISTEMA DE VÁCUO:

bomba mecânica (pressão mínima 8×10^{-3} Torr)

bomba difusora com "trap" de nitrogênio (pressão mínima 4×10^{-7} Torr)

A vista esquemática do experimento TC-1 está mostrada na Fig. 2. Na figura estão mostrados o dispositivo TC-1, os bancos de energização, e os diagnósticos em uso. O circuito equivalente dos bancos de capacitores está mostrado na Fig. 3.

Para tornar o dispositivo operacional foram necessários montagens e testes de componentes eletroeletrônicos, tais como:

- 4 chaves de ignição do tipo distorção de campos com "crow-bar", sendo elas para bancos de ionização (1 unidade), divertor magnético (1 unidade) e principal (2 unidades). Uma chave do tipo distorção de campos está ilustrada na Fig. 4.
- vários tipos de chaves de ignição sem "crow-bar" para pulsos de alta corrente em chaves "crow-bar"
- vários tipos de chaves do tipo "spark-gap"

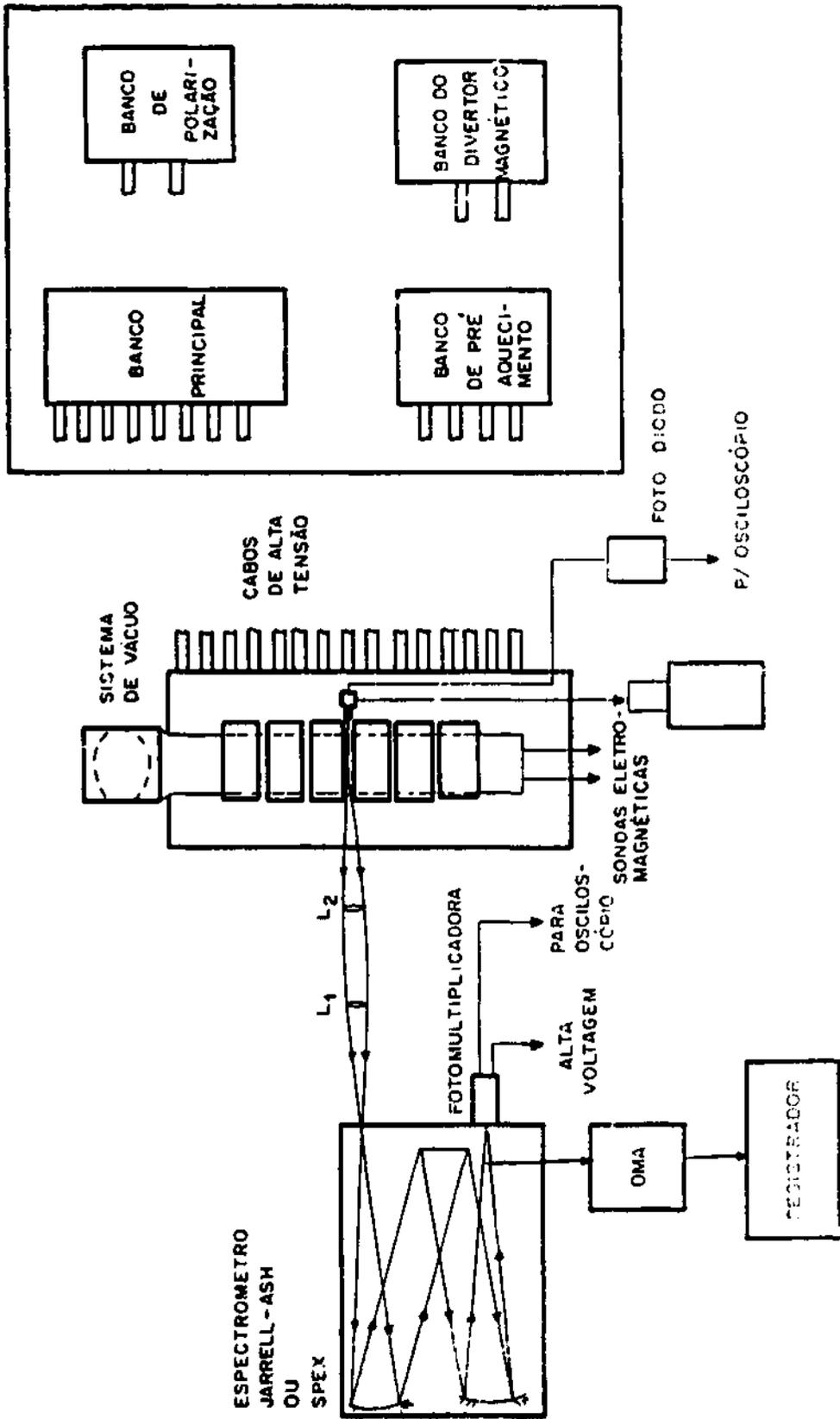


Fig. 2 - Vista esquemática do experimento TC-1.

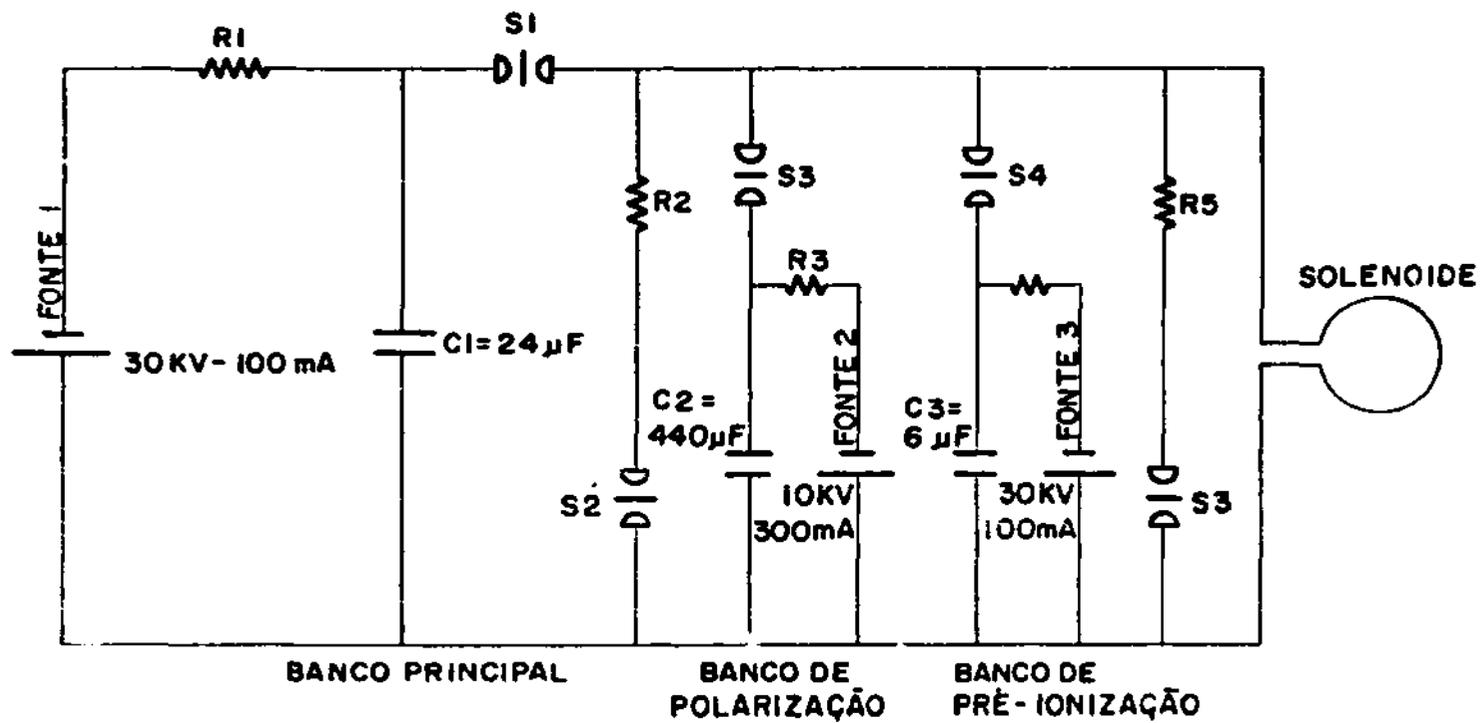


Fig. 3 - Circuito equivalente dos bancos de capacitores (principal, polarização e pré-ionização).

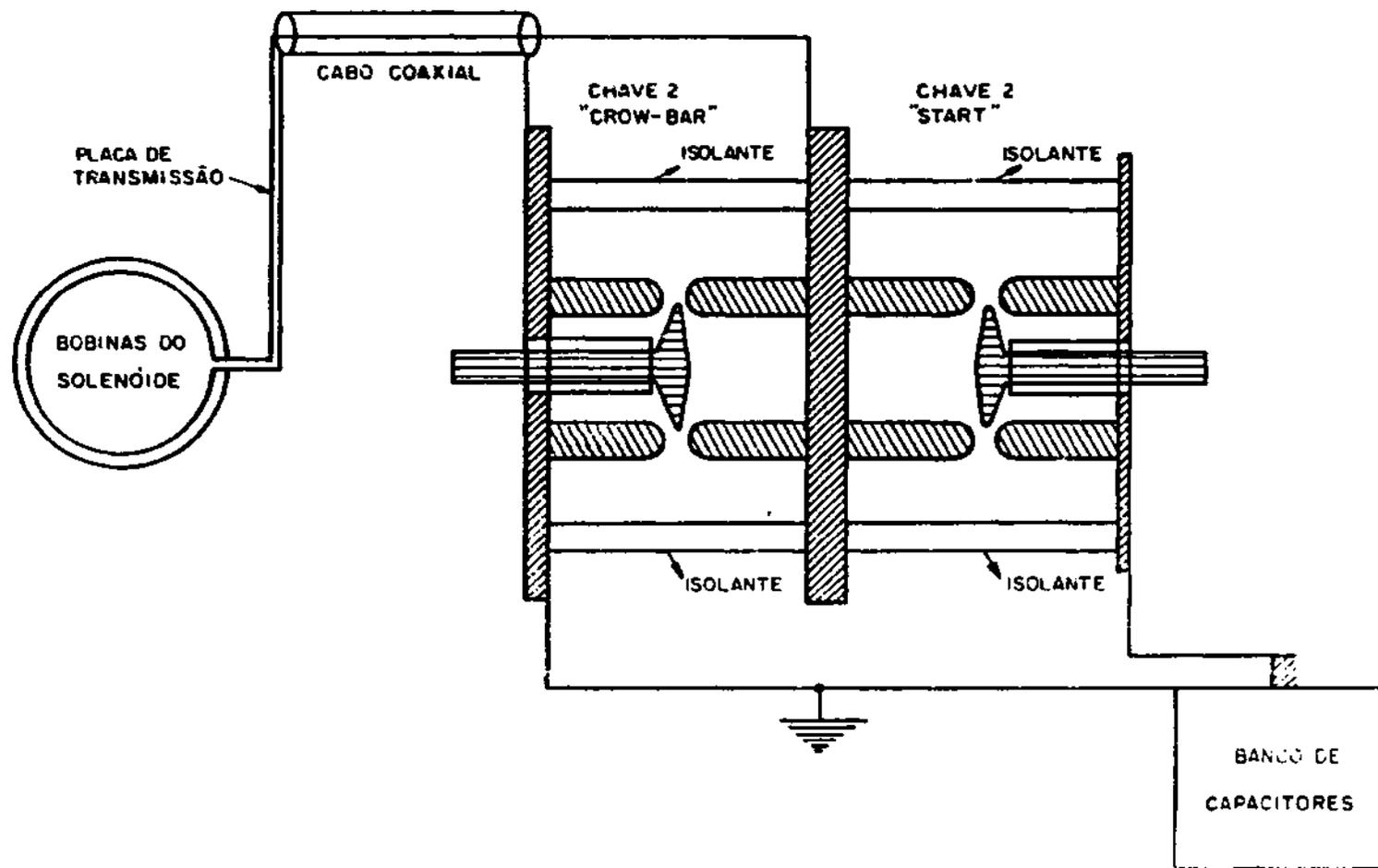


Fig. 4 - Desenho esquemático da chave do tipo distorção de campo com "crow-bar".

- 6 geradores de pulso de 300 V com atrasadores de pulso para regulação de tempo dos pulsos de disparo e "crow-bar" das chaves
- 6 amplificadores de pulso de 15 kV para os gatilhos das chaves de ignição e "crow-bar"
- resistores líquidos (solução de sulfato de cobre com água deionizada)
- vários sistemas de segurança de aterramento elétrico com contato no vácuo (eletromagnético) e do tipo manual
- 6 painéis de comando para fontes de alimentação de alta tensão para os bancos de capacitores e um controle de segurança.

Nas Figs. 5(a), (b) e (c) são mostradas as performances dos bancos de capacitores com e sem "crow-bar", para descarga no vácuo.

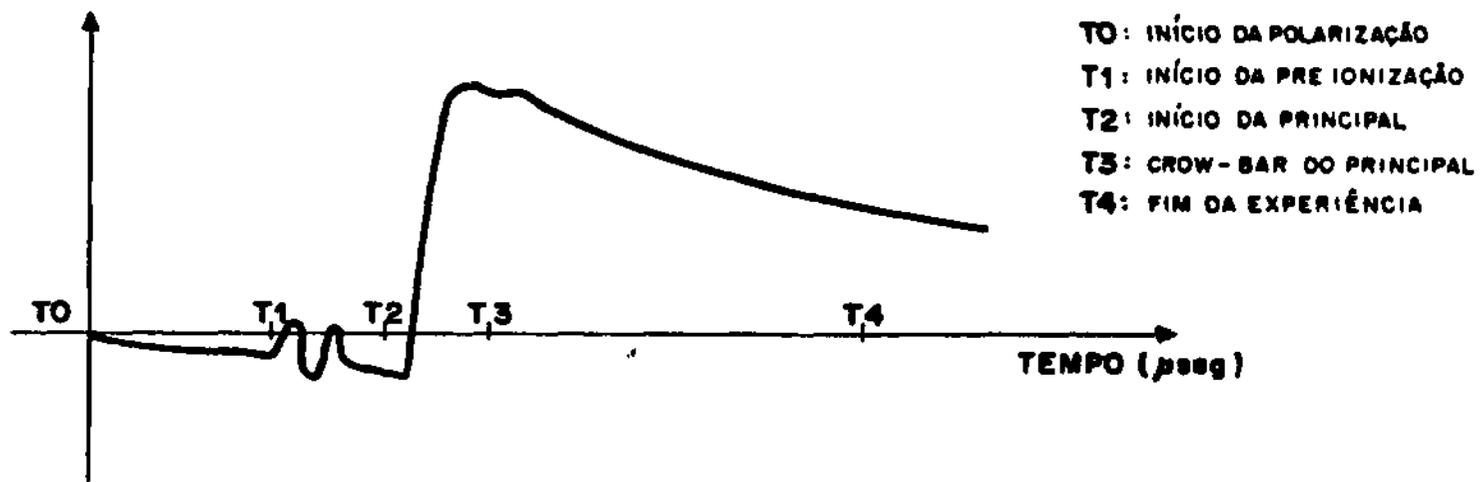
3 - MODO DE OPERAÇÃO DO TC-1

Exporemos, a seguir, o modo de operação da máquina que devido a sua complexidade requer duas pessoas para sua operação e cerca de três a quatro pessoas para tornar os diagnósticos funcionais.

Típicamente, como primeiro passo, todo o sistema de vácuo é acionado para se obter um vácuo de pressão de base de 4×10^{-7} Torr, atingido após duas a três horas de bombeamento. Cumprida esta etapa, todos os filamentos de aquecimento das válvulas de geradores de pulso e fontes de alimentação são ligados e o banco de pré-ionização é disparado em vácuo para limpeza do vaso de vácuo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAMAKI, E.A.; PORTO, P.; BERNI, L.A.; HONDA, R.Y.; UEDA, M.; DOI, I.; MACHIDA, M. Optimization of implosion phase on TC-1. International Symposium on Radiation physics, 4., São Paulo, Oct. 1988. A ser publicado em Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.
- DOLAN, T.J. Pinches and compact toruses. In: _____ Fusion research. USA, Pergamon, 1982, v. 2, Cap. 12, 323.
- KAYAMA, M.E. Reconexão de linhas magnéticas e formação de configuração reversa de campo. Tese de Doutorado, Campinas, SP, UNICAMP, 1987.
- MACHIDA, M.; COLLARES, M.P.; HONDA, R.Y.; SAKANAKA, P.H.; SHEID, V.H.B. Torus C-1 Field Reversed Theta Pinch at UNICAMP. In: JAPAN-BRAZIL WORKSHOP ON SCIENCE AND TECHNOLOGY, 4., São Paulo, 1984. Proceedings. São Paulo, Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1984, v. 3, p. 176-187.
- MACHIDA, M.; ARAMAKI, E.A.; PORTO, P.; SAKANAKA, P.H.; UEDA, M.; ASO, Y. Recent Results in TC-1 UNICAMP. In: JAPAN-BRAZIL WORKSHOP ON SCIENCE AND TECHNOLOGY, 6., São Paulo, Aug. 11-12, 1988. Proceedings. São Paulo, ACIESP, 1988, v. 3, p. 348-358.
- MACHIDA, M.; ARAMAKI, E.A.; TAKAHASHI, T.; OHARA, M.; NOGI, Y. Photodiode Measurements in NUCTE II. Aceito para publicação na Revista Brasileira de Física.
- OHI, S.; MINATO, T.; KAWAKAMI, Y.; TANJYO, M.; OKADA, S.; ITO, Y.; KAKO, M.; GOTO, S.; ISHIMURA, T.; ITO, H. Quadrupole Stabilization of the n=2 Rotational Instability of a Field-Reversed Theta Pinch Plasma. Physical Review Letters, 51(12):1042-1045, Sep. 1983.
- SHIMAMURA, S.; NOGI, Y. Helical Quadrupole Field Stabilization of Field Reversed Configuration Plasma. Fusion Technology, 9(1)-69-77, Jan. 1986.
- TUSZEWSKI, M.; LINFORD, R.K. Particle Transport in Field-Reversed Configurations. Physics of Fluids, 25(5):765-774, May 1982.



12 / - 13 -

Fig. 6 - Sequência temporal de uma descarga típica de um FRC com "crow-bar" no banco principal.

Após cada descarga, o sistema de vácuo é novamente acionado e o gás hélio dentro da câmara é substituído com um novo fluxo, para evitar a presença de impurezas na descarga.

Atualmente, o ponto crítico neste processo de tomada de dados é o método de aquisição de dados, que é efetuada com osciloscópios. No método atual, além da impossibilidade de se verificar os efeitos dos vários parâmetros de operação da máquina no plasma produzido, devido ao número limitado de canais dos osciloscópios, os diversos diagnósticos precisam estar muito bem ajustados um em relação aos outros de modo a permitir comparações de eventos durante a descarga, dificultando, dessa forma, o andamento do experimento. Uma solução rápida e eficiente para o problema, seria a implantação de um sistema de aquisição de dados por computador, utilizando conversores analógicos/digitais rápidos, que unificariam o processo temporal e aumentariam os números de canais acessíveis aos diagnósticos.

4 - DIAGNÓSTICOS UTILIZADOS

Estamos atualmente operando a máquina TC-1 com sete tipos de diagnósticos e implantando vários outros.

Os diagnósticos em operação normal no momento são:

- a) Sondas Rogowski
- b) Sonda magnética interna
- c) Sonda magnética externa local e de volta completa
- d) Sonda copo de Faraday
- e) Espectroscopia no visível
- f) Fotodiodo para radiação Bremsstrahlung no visível
- g) Fotografia ultra-rápida com IMACCN

Os diagnósticos que estão sendo testados atualmente são:

- a) Sonda PZT de pressão de plasma
- b) Espectroscopia no visível de 500 canais com OMA

Os diagnósticos em desenvolvimento são:

- a) interferometria com laser de CO_2
- b) Espalhamento Thomson com laser de Rubi

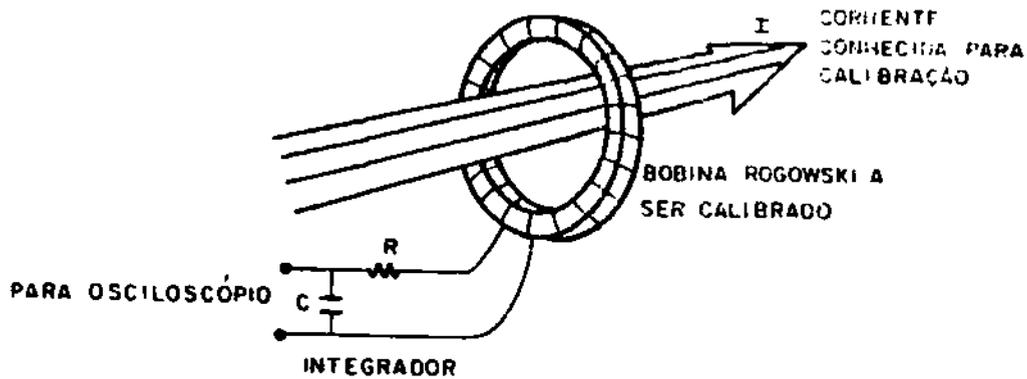
A seguir, iremos descrever os princípios básicos dos diagnósticos que estão atualmente em uso no TC-1 e os sinais típicos obtidos com aqueles diagnósticos.

4.1 - SONDAS DE ROGOWSKI

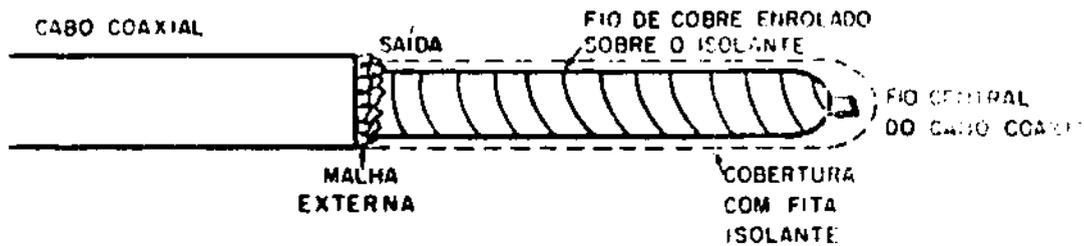
A sonda de Rogowski é uma sonda magnética externa simples usada para medir altas correntes pulsadas. Ela é construída utilizando-se um cabo coaxial comercial de 50 Ohms em torno do qual um fio de cobre é enrolado, dando-se a ele a forma de uma espira toroidal como está indicado na Fig. 7(a). A Fig. 7(b) fornece os detalhes da construção de uma sonda Rogowski. O seu princípio de funcionamento é a lei de Ampère. No presente experimento as sondas foram calibradas usando-se um transformador de corrente da marca Pearson Electronics Inc., modelo 411. O fator de calibração obtido foi de 24 kA/V. A corrente monitorada pela Sonda de Rogowski, como mostrada na Fig. 7(c), é utilizada na determinação da qualidade de uma descarga efetuada, a qual é baseada em termos de uma correta sequência temporal, um alto valor de pico e um correto período de oscilações de corrente que ocorrem nos solenóides do dispositivo.

4.2 - SONDA MAGNÉTICA INTERNA

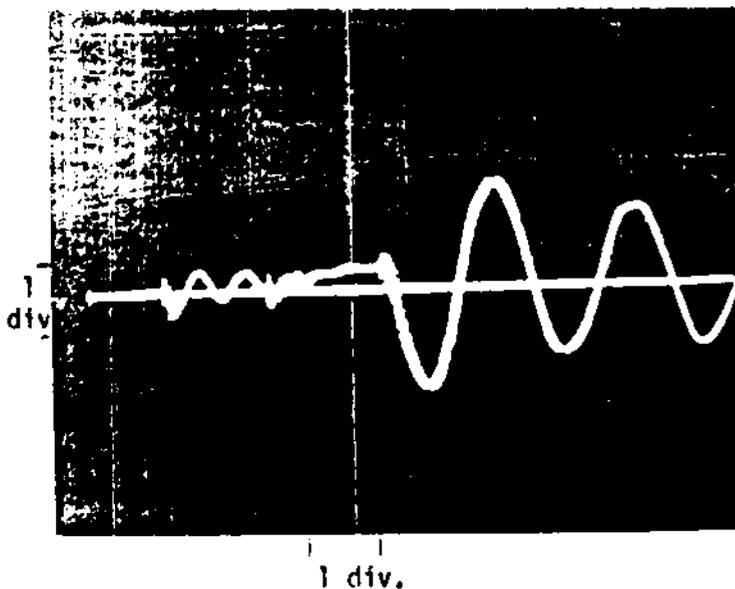
A sonda magnética interna é uma sonda de pequenas dimensões (em torno de alguns milímetros) que é colocada dentro do próprio plasma com o objetivo de se medir o campo magnético aprisionado dentro



a) Sistema de calibração da Sonda Rogowski.



b) Construção do Rogowski.



c) Sinal típico da sonda Rogowski instalado em uma das seções do solenóide principal.

vert.: 0,5 v/div.
hor.: 10 μ s/div.

Fig. 7 - Sistema de calibração, construção e um sinal típico da sonda Rogowski instalado em uma das seções do solenóide principal.

do mesmo. O seu princípio de funcionamento está baseado na lei de Biot-Savart de eletromagnetismo. A sonda deve ser acoplada a um integrador passivo na entrada do osciloscópio para nos fornecer o valor do campo magnético local dado pela relação:

$$B(t) = \frac{nA}{RC} V(t) \quad (\text{MKS}) \quad (1)$$

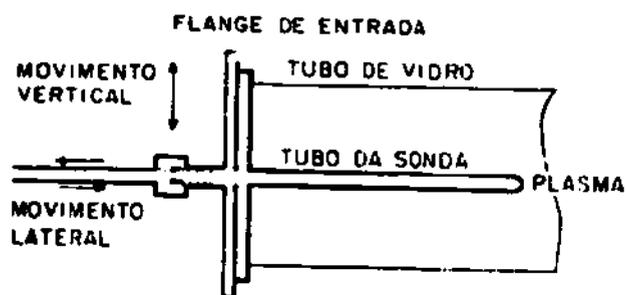
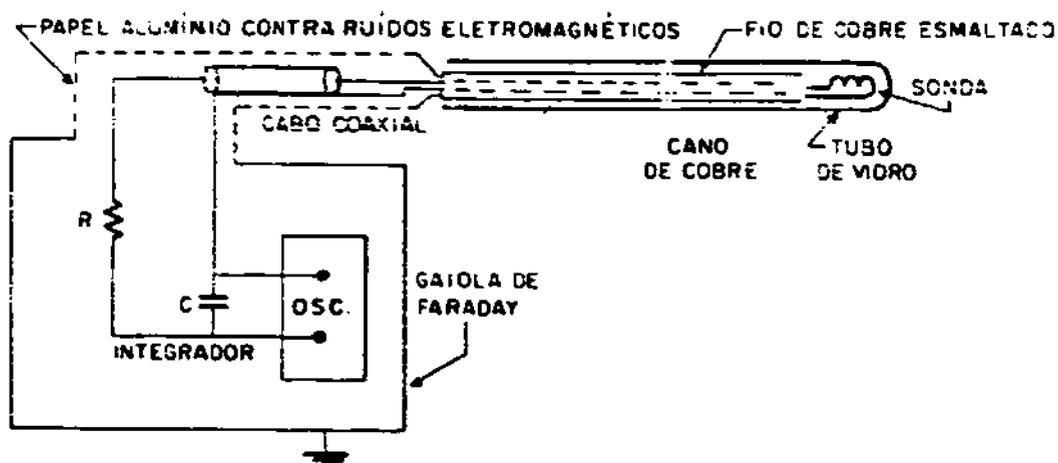
onde $B(t)$ = campo magnético local na posição da sonda, n = número de espiras da sonda, A = área efetiva da sonda perpendicular ao campo magnético, $V(t)$ = voltagem lida no osciloscópio, RC = constante de tempo de integração do integrador passivo.

Na Fig. 8(a) são mostrados o esquema de montagem e a geometria de instalação da sonda magnética interna do TC-1. Na Fig. 8(b) mostramos os sinais da sonda magnética interna obtidos na descarga, onde se pode notar a presença do campo magnético aprisionado pelo plasma, bem como as deformações do sinal durante a fase de implosão.

A desvantagem deste método de diagnóstico é o seu efeito destrutivo no equilíbrio do confinamento magnético do plasma. A interação plasma/sonda é muito rápida e, em cerca de 2 μ s o confinamento é destruído (Kayama, 1987). Geralmente, as sondas internas são utilizadas somente para o estudo do plasma na fase de implosão e aprisionamento de campos magnéticos em plasmas na fase inicial da formação do FRC.

4.3 - SONDA MAGNÉTICA EXTERNA LOCAL E DE ENLACE

Este par de sondas local e de enlace, constituem uma sonda conhecida por sonda de fluxo excluído que é normalmente utilizado para a determinação do raio de separatrix (Tuszewski, 1982). O raio de separatrix define basicamente a interface entre o plasma confinado e a região de vácuo. O posicionamento da sonda de fluxo excluído está mostrado na Fig. 9(a) juntamente com seu circuito elétrico. A sonda local é colocada entre o solenóide e o tubo de pìrex. Os sinais obtidos pelas sondas são mostrados na Fig. 9(b) e indicam que o sinal da sonda local não é afetado pela presença do plasma, enquanto que o da sonda de enlace é claramente afetado.

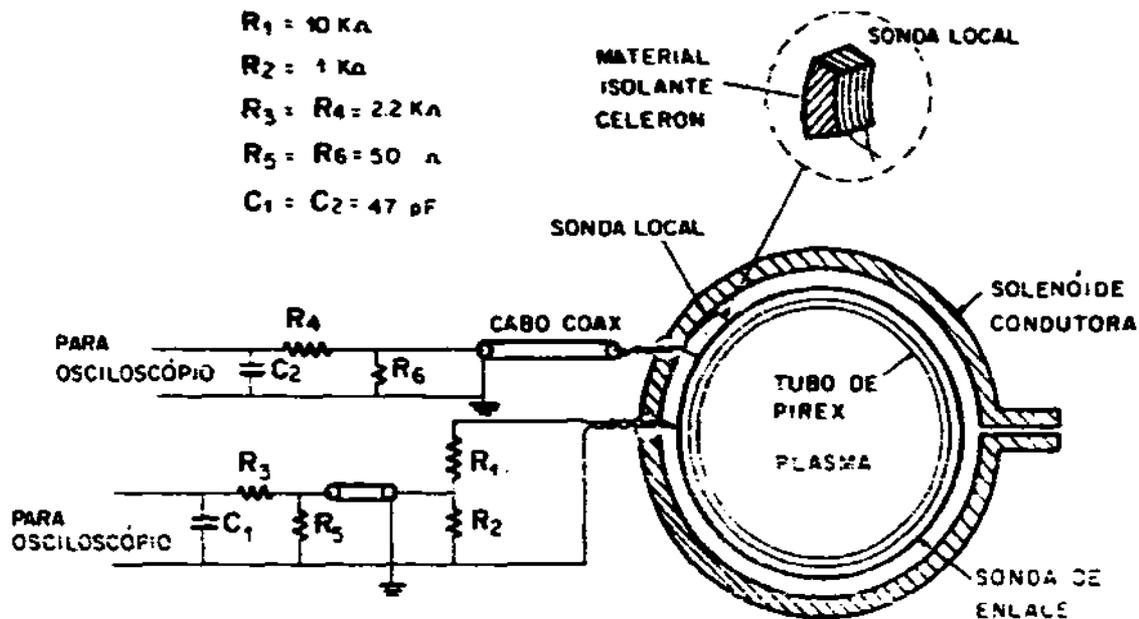


a) Esquema de montagem e instalação de uma sonda magnética no vaso de vácuo do TC-1.

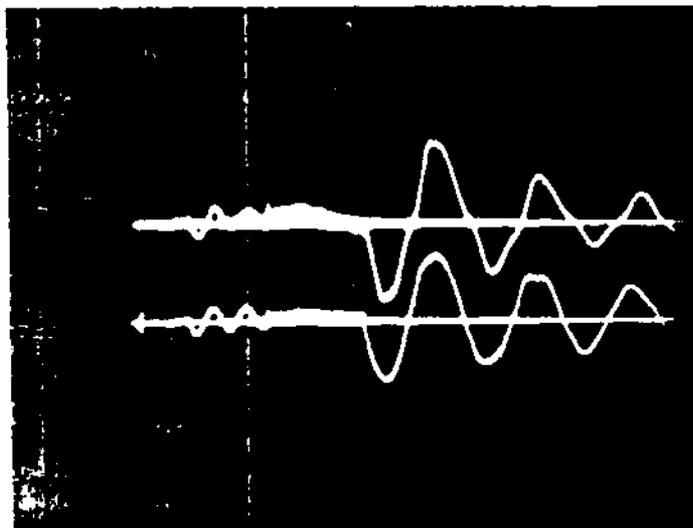
b) Sinal típico obtido por uma sonda magnética interna (traço superior) e uma sonda magnética local externa (traço inferior) em uma descarga no TC-1 com produção de plasma.

vert.: 0,2 v/div. (traço sup.)
1,0 v/div. (traço inf.)
hor.: 10 μ s/div. p/ ambos.

Fig. 8 - Montagem e sinais típicos de uma sonda magnética interna e local externa.



a) Posicionamento e circuito elétrico da sonda de fluxo excluído. Vista frontal em corte.



b) Sinal típico da sonda de fluxo excluído.

traço sup.: sonda de uma volta completa no tubo de vácuo.
 traço inf.: sonda local.

vert.: 0,1 v/div. (sup.)
 1,0 v/div. (inf.)
 hor.: 10 μs /div. (ambos).

Fig. 9 - Montagem e sinal típico de uma sonda de fluxo excluído.

O valor do raio de separatrix é obtido utilizando-se a seguinte fórmula:

$$R_s = \left[\frac{\Delta\phi(t)}{\nabla B(t)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

onde $R_s(t)$ = raio de separatrix, $\Delta\phi(t)$ = diferença de sinais obtidos pelas duas sondas, $B(t)$ = campo magnético sem plasma.

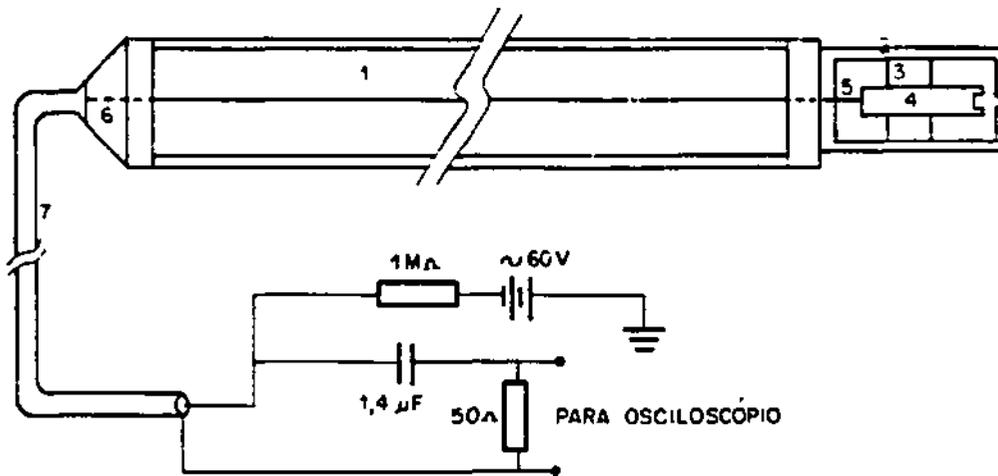
Este diagnóstico, que não perturba o plasma, é extremamente útil para estudar o desenvolvimento temporal da dimensão do plasma, tanto radial quanto longitudinal.

4.4 - SONDA COPO DE FARADAY

Esta é uma sonda eletrostática que é inserida no tubo de pìrex até a borda do plasma a fim de se detectar o fluxo de íons e elétrons que escapam do confinamento magnético. Por ser uma sonda interna que perturba o plasma, não é possível colocá-la dentro do volume do plasma. Entretanto, apesar de estar fora do plasma, os resultados obtidos com a sonda, indicam que o comportamento interno do plasma está relacionado diretamente com as partículas que escapam do confinamento magnético. Na Fig. 10(a) está mostrada a montagem esquemática da sonda e o circuito elétrico correspondente. A voltagem de polarização é utilizada para repelir os elétrons do plasma que está sendo medido e assim possibilitar somente a coleta dos íons. A densidade de corrente de partículas e a densidade do plasma que escapam da região de confinamento são obtidas usando-se as fórmulas:

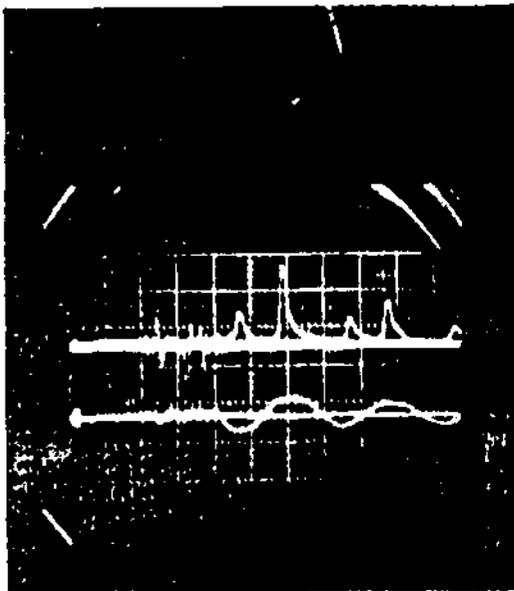
$$J = \frac{V}{A_0 \cdot R} \text{ (A/cm}^2\text{)} \quad \text{e} \quad n = \frac{J}{e \cdot v} \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad (3)$$

onde V = voltagem do sinal medido no osciloscópio, A_0 = área da abertura do orifício da sonda ($1.9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$), R = resistência de entrada (50 Ohms), J = densidade de corrente detectada, v = velocidade de escape = $D/\Delta t$ sendo D a distância do centro do solenóide até a sonda (35 cm) e Δt o intervalo de tempo entre a descarga do banco principal e o apareci



- | | |
|--------------------|------------------------------------|
| 1-TUBO DE PIREX | 5-CENTRO DO CABO COAXIAL |
| 2-TUBO DE COBRE | 6-CONECTOR SELADO |
| 3-ISOLANTE (NYLON) | 7 CABO COAXIAL COM BLINDAGEM DUPLA |
| 4-COLETOR DE COBRE | |

a) Montagem esquemática da sonda copo de Faraday e seu circuito



b) Sinal sup.: copo de Faraday
vert.: 2 v/div.
hor.: 10 μs/div.

Sinal inf.: sinal de sonda
vert.: 0,5 v/div.
hor.: 10 μs/div.

Fig. 10 - Montagem esquemática da sonda copo de Faraday e um sinal típico da sonda.

mento do primeiro pico de sinal do copo de Faraday, e = carga elementar e n = densidade de íons que escapam das extremidades do FRC, os quais são coletados pelo copo de Faraday.

Um sinal típico obtido com a sonda copo de Faraday está mostrado na Fig. 10(b), onde o sinal da sonda magnética serve de referência temporal com relação aos tempos de disparos dos bancos.

4.5 - ESPECTROSCOPIA NO VISÍVEL

O laboratório de plasma da UNICAMP está presentemente equipado com dois espectrômetros: um de marca Jarrel-Ash, modelo 78-466 com sistema Czerny Turner e grade de 500 linhas/mm e outro da marca SPEX, modelo 1702 com sistema Czerny Turner e grade de 1200 linhas/mm.

Atualmente, os dados espectroscópicos estão sendo obtidos com o espectrômetro da Jarrel-Ash que está em operação com uma fotomultiplicadora RCA 31034. O espectrômetro está sendo usado para monitorar a intensidade da linha de He II (4686 Å) durante a fase de implosão do plasma criado na descarga principal. Esta medida permite a otimização da descarga pois quanto maior a intensidade daquela linha iônica maior a temperatura eletrônica e a densidade do plasma obtido.

Outra medida importante sendo efetuada com o espectrômetro da Jarrel-Ash é a temperatura iônica do plasma baseado no alargamento Doppler da linha de emissão do íon que é dado por:

$$\Delta\lambda_{1/2} = 7,7 \times 10^{-5} \lambda_0 \sqrt{T/A} \quad (\text{Å}) \quad (4)$$

onde A = peso atômico do íon em unidades de massa atômica, $\Delta\lambda_{1/2}$ = largura a meia altura da linha de comprimento de onda λ_0 = (em Å) e T = temperatura iônica em eV. No TC-1 a linha HeII (4686 Å) é adotado para a medida da temperatura iônica.

O espectrômetro SPEX está acoplado a um sistema de aquisição de dados denominado OMA (Optical Multichannel Analyser) de 500 canais e com detector SIT (Silicon Intensified Target). Este sistema, devido a sua alta sensibilidade aos ruídos eletromagnéticos foi colocado numa sala blindada, especialmente construída para equipamentos sensíveis. No sistema do espectrômetro SPEX a radiação emitida pelo plasma criado em TC-1 é captada por fibras óticas de 20 m de comprimento e guiada à sala blindada. No momento, este conjunto ótico está sendo calibrado e deverá entrar em operação nos próximos meses substituindo o espectrômetro da Jarrel-Ash de um canal, situado junto à máquina TC-1. A grande vantagem do sistema OMA multicanal é que ele pode permitir a obtenção do perfil da linha alargada num único disparo da máquina em contraste com o sistema de um canal que requer vários disparos com boa reprodutibilidade para fazer a varredura no comprimento de onda e obter o tal perfil.

4.6 - DIAGNÓSTICO COM FOTODIODO DA RADIAÇÃO BREMSSTHALUNG

Durante a fase de implosão do plasma na etapa principal, o plasma emite uma radiação contínua no visível que é possível ser detectada por fotodiodos. Esta radiação contínua é de Bremsstrahlung e pode ser relacionada à diferença de potencial obtida no fotodiodo (Machida et al, 1988) por:

$$V = A n^2 r_s T^{1/2} \quad (5)$$

onde A = fator de calibração, n = densidade de elétrons, r_s = raio de separatrix e T = temperatura eletrônica.

O fator de calibração pode ser obtido usando uma fonte conhecida de luz, o raio de separatrix por sondas de fluxo excluído, a densidade pode ser obtida pela interferometria de laser de CO₂ e a temperatura por espalhamento Thomson da luz de laser de Rubi. No entanto, operar um experimento com interferometria e espalhamento Thomson é muito difícil e oneroso, ao contrário daquele com fotodiodo que é direto e barato. Usando-se a fórmula acima pode se determinar o produto $n^2 \times T^{1/2}$, caso um fotodiodo seja utilizado. Caso a densidade seja medida espectroscópicamente

picamente, pode-se determinar T . Ademais, este sistema do fotodiodo, se utilizado no modo multicanal pode ser usado no estudo da instabilidade $n=2$, que sempre ocorre no FRC. A velocidade de rotação, a sua direção e sentido, assim como a amplitude da instabilidade já foram determinados em outras máquinas FRC (Ohi et al., 1983) e serão estudados no TC-1 pelo método de fotodiodos.

4.7 - FOTOGRAFIAS ULTRA-RÁPIDAS COM IMACOM

O sistema IMACOM (Image Converter) é um instrumento optoeletrônico que possibilita a observação da dinâmica da implosão e equilíbrio do plasma produzido num FRC. O sistema IMACON pode ser operado em dois modos de operação: no modo streak e no modo framing. No primeiro modo, a imagem contínua no tempo, do plasma, é registrada num filme Polaroid durante intervalos de tempos que podem ser de 5, 10, 50 ou 100 μ s, dependendo do ajuste do IMACON. No modo framing, a imagem é congelada durante um intervalo de tempo curto, por exemplo 25 ns, e repetida por 8 vezes, e fotografada com uma câmera Polaroid.

O IMACON além de ser um instrumento muito útil para o estudo da dinâmica da implosão pode ser utilizado para se fazer a medida de geometria do plasma com excelente resolução temporal, medida esta que pode ser comparada com medidas obtidas com outros tipos de diagnósticos (Shimamura et al., 1986).

5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O primeiro passo do experimento TC-1, depois de iniciada a operação da máquina foi iniciar o estudo de formação e implosão do plasma durante a fase inicial da etapa principal. Neste estudo foram utilizados 7 sistemas de diagnósticos e os resultados experimentais mais relevantes obtidos através destes diagnósticos serão discutidos a seguir.

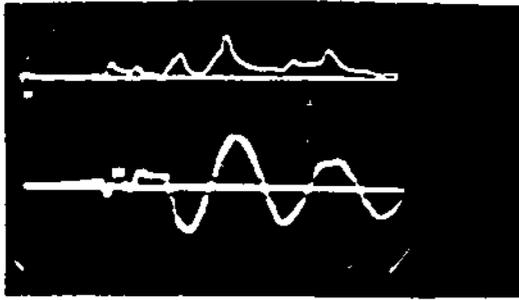
Uma das metas principais do experimento TC-1 nesta etapa foi a otimização da máquina que foi efetuada analisando-se a emissão de luz do plasma de hélio e sinais eletromagnéticos das sondas, enquanto se

mudava as condições do plasma e se variava os tempos de disparos dos bancos, assim como, a pressão de trabalho e de base.

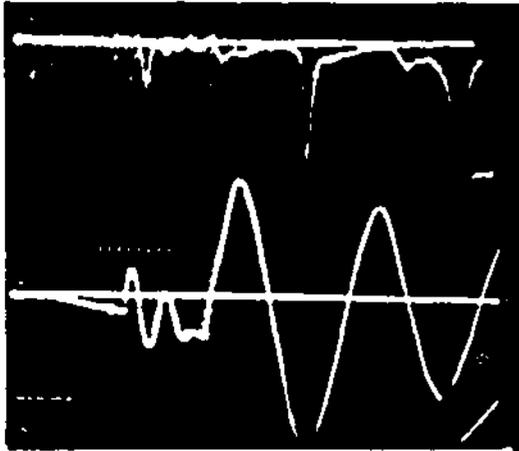
A pressão de base atingida no TC-1 tem uma importância vital na formação do seu plasma FRC. Na Fig. 11(a) e 11(b) são mostrados os sinais dos diagnósticos obtidos numa descarga onde a pressão de base era alta (em torno de 6×10^{-5} Torr). Neste caso, o sinal da linha de Hélio II pode ser visto somente depois da segunda compressão da etapa principal, e a radiação Bremsstrahlung observada com o fotodiodo tem também um pico de intensidade mais alto na segunda compressão. Quando a pressão de base é melhor, i.e., 7×10^{-7} Torr, a situação é nitidamente diferente, como pode ser visto nas Figs. 11(c) e 11(d). Podemos notar que a linha de Hélio II já aparece intensa na primeira compressão e a radiação Bremsstrahlung acompanha também o mesmo comportamento. A condição ótima de operação da máquina foi escolhida como sendo o caso em que a emissão da linha de Hélio II na primeira compressão era a mais intensa para diferentes pressões de trabalho, com a pressão de base fixa em 7×10^{-7} Torr.

Comparando-se os resultados dos três métodos de diagnósticos: copo de Faraday, espectroscopia e fotodiodo, mostrados na Fig. 12(a), (b) e (c), chegamos à conclusão de que os picos dos sinais dos três diagnósticos apresentam o valor máximo quando são operados em pressão de trabalho de 10 mTorr. Este dado é bastante relevante, pois as medidas com o copo de Faraday, que é uma sonda elétrica externa, mostram que o plasma que escapa da região de confinamento tem uma conexão direta com o plasma confinado interior de campos magnéticos "fechados", que deveria estar isolado da região externa que é ocupada por campos magnéticos "abertos". Estamos instalando no momento, sondas do tipo copo de Faraday e internas multicanais e fotodiodos também multicanais para averiguar com maior precisão este fenômeno ainda não explicado.

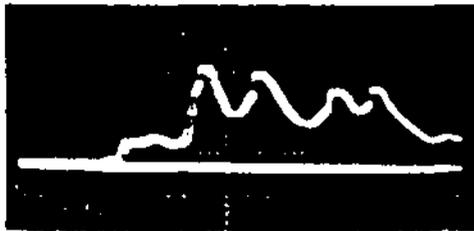
Outro fator importante na otimização da descarga do TC-1 é o efeito do intervalo de tempo entre o fim da descarga de pré-ionização e o início da descarga principal (ΔT_1). O TC-1, que é equipado com um sistema "crow-bar" de interrupção da descarga, permite variar o intervalo ΔT_1 (vide Fig. 13) a fim de variar o grau de ionização do plasma antes da



- a) Sinal sup.: fotodiodo
hor.: 10 μ s/div.
Sinal inf.: sonda magnética
externa
pressão de base: 6×10^{-5} Torr.



- b) Superior: espectrômetro
He II (4686 Å)
hor.: 10 μ s/div.
Inferior: sonda magnética
pressão de base: 6×10^{-5} Torr.

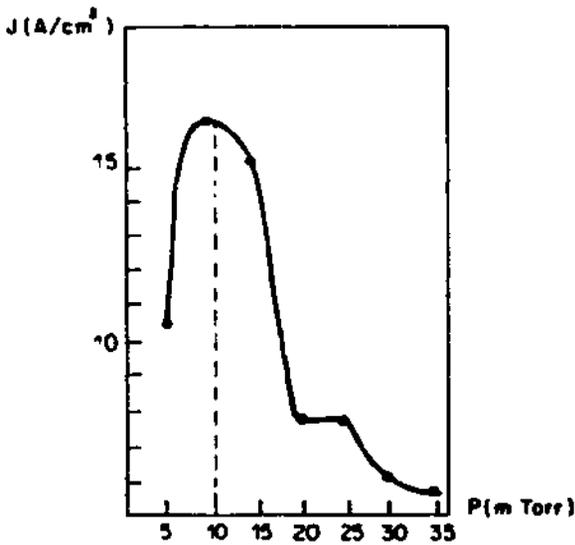


- c) sinal do fotodiodo
hor.: 10 μ s/div.
pressão de base: 7×10^{-7} Torr.

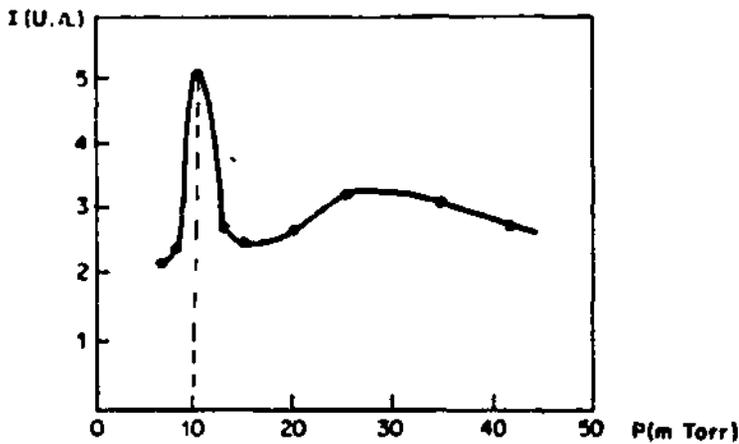


- d) Superior: espectrômetro
He II (4686 Å)
hor.: 10 μ s/div.
Inferior: sonda magnética
interna
pressão de base: 7×10^{-7} Torr.

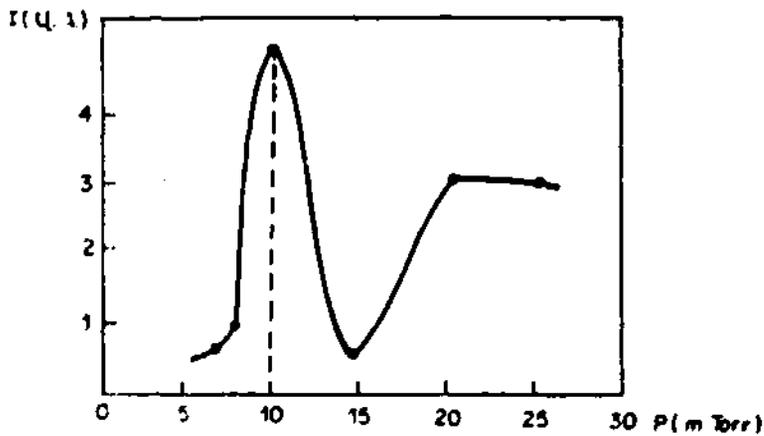
Fig. 11 - Sinais obtidos com o espectrômetro centrado na linha He II e fotodiodo na radiação visível para descargas do TC-1 com diferentes pressões de base.



a) densidade de corrente para diferentes pressões de gás.



b) sinal de fotodiodo para diferentes pressões de gás.



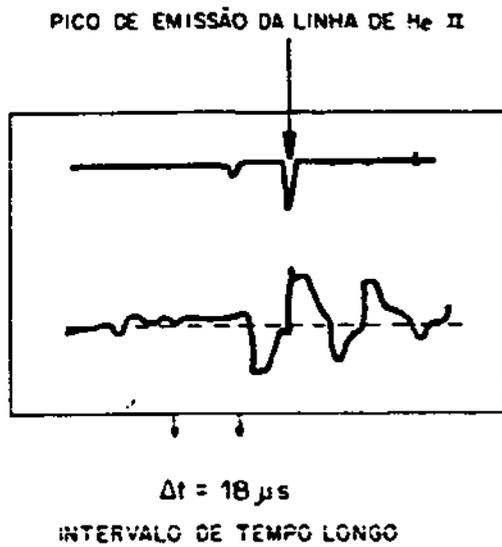
c) sinal de espectrômetro para diferentes pressões de gás.
(linha de He II em $3 \mu\text{s}$)

Fig. 12 - Curvas de intensidade versus pressão de operação obtidas através de medidas com copo de Faraday, fotodiodo e espectrômetro. Todos os pontos foram obtidos para um tempo fixo de $3 \mu\text{s}$ após a descarga do banco principal.

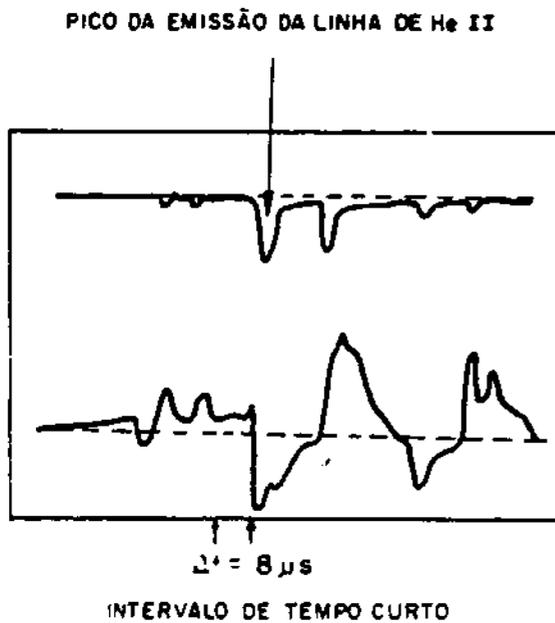
implosão principal. No resultado da Fig. 13(a) o ΔT_1 foi de $18 \mu s$, enquanto que no da Fig. 13(b) o ΔT_1 diminuiu para $8 \mu s$. Para o primeiro caso a emissão da linha de He II só aparece no segundo ciclo de oscilação enquanto que no segundo caso o pico de emissão já aparece no primeiro ciclo. Isto evidencia o efeito do tempo ΔT_1 na eficiência de produção de plasma uma vez que a intensidade da linha de He II é proporcional à densidade e temperatura do plasma.

Um parâmetro de plasma importante no TC-1 determinado espectroscopicamente foi a temperatura iônica. O método empregado foi o do alargamento Doppler da linha 4686 \AA de He II que é proporcional à temperatura dos íons (Fig. 14) e se obteve o valor de 70 eV .

Finalmente uma medida realizada com fotografia ultra rápida no modo "streak" revela que para implosões de plasma em pressão de operação baixa (cerca de 4 mTorr) o tempo de implosão é muito rápido ($0,8 \mu s$), obtendo-se um raio de plasma pequeno de $1,5 \text{ cm}$, enquanto que para pressão de operação alta (20 mTorr), o tempo de implosão é lento ($4,8 \mu s$) e o raio do plasma obtido é maior do que $4,7 \text{ cm}$, como é mostrado na Fig. 15. A análise das fotografias obtidas com IMACON para diferentes pressões de operação com pressão de base de $7 \times 10^{-7} \text{ Torr}$, mostra uma boa concordância com outros métodos de diagnóstico, obtendo-se também uma pressão ótima de trabalho de 10 mTorr .



a) Sinal obtido do espectrômetro (traço superior). Note que o pico aparece somente no segundo ciclo do traço inferior (sonda magnética interna).



b) Note que a emissão da linha de He II (traço superior) é mais forte que o caso a) acima e parece no primeiro ciclo do traço inferior (sonda magnética interna).

Fig. 13 - O efeito do intervalo de tempo Δt (tempo entre o término da descarga do banco de pré-ionização e início da descarga do banco principal) para emissão da linha de He II.

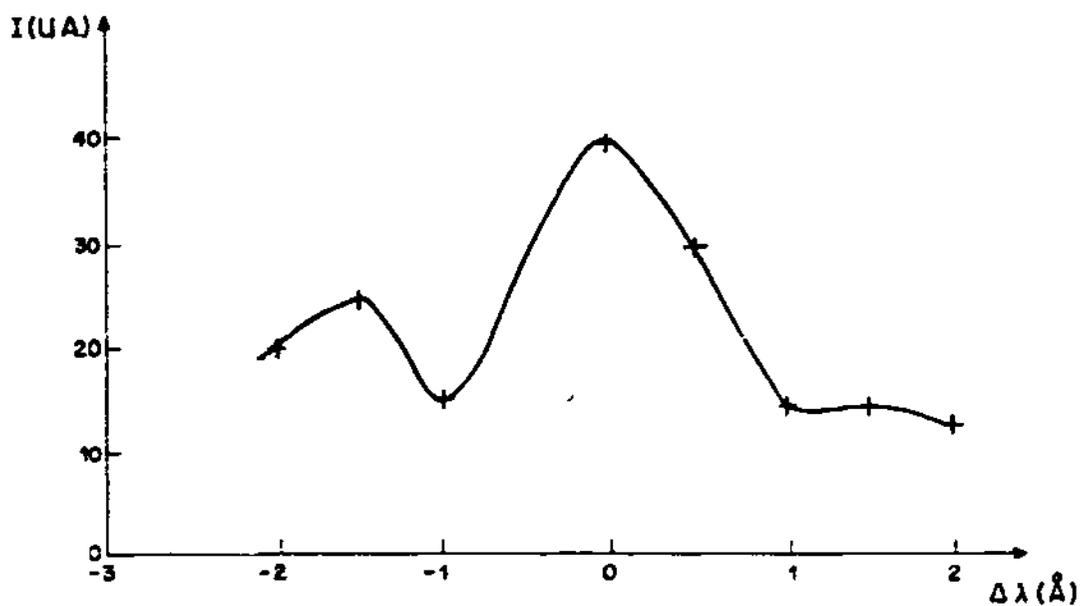
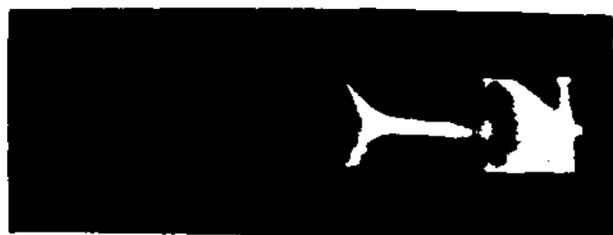


Fig. 14 - Curva de alargamento Doppler da linha de He II (4686 Å) para a determinação da temperatura de íons do plasma. A temperatura obtida é de 70 eV.



a) pressão de trabalho:
4 mTorr



b) pressão de trabalho:
10 mTorr



c) pressão de trabalho:
20 mTorr



d) pressão de trabalho:
30 mTorr

Fig. 15 - Fotografias ultra-rápidas obtidas com IMACON no modo STREAK para diferentes pressões de operação com gás hélio. As setas indicam o início da descarga no banco principal.

Como conclusões, podemos afirmar que no TC-1:

- 1) para se obter um plasma de boa qualidade a pressão de base precisa ser a mais baixa possível;
- 2) os valores de pico de sinais obtidos com copo de Faraday (plasma que escapa do confinamento), espectroscopia (intensidade da linha de He II) e fotodiodo (intensidade contínua da luz) durante a variação de pressão de trabalho mostram uma correlação direta dos três métodos de diagnósticos;
- 3) todos os diagnósticos usados até o momento indicam uma pressão ótima de trabalho de 10 mTorr para o presente modo de operação
- 4) o efeito do intervalo de tempo entre a pré-ionização e a descarga principal é importante para se obter uma boa formação de FRC.

6 - TRABALHOS FUTUROS

Após concluídos os estudos sobre a pré-ionização, imploração e formação de configuração de campo reverso em TC-1, a próxima etapa será a obtenção de estabilidade FRC por aproximadamente 20 μ s, utilizando-se o "crow-bar" na chave principal. Espera-se que durante este intervalo de tempo apareça a instabilidade rotacional $n=2$ que deformará o plasma, perdendo-se, assim, o confinamento magnético. Esta instabilidade poderá ser suprimida utilizando-se uma nova técnica que estamos propondo que é a utilização do divertor magnético pulsado, o qual é aplicado quando se inicia a instabilidade.

Na etapa seguinte será feito o diagnóstico do plasma durante a fase de estabilidade e surgimento de instabilidade $n=2$. Nesta fase será necessário aplicar todos os diagnósticos disponíveis e estudar as variações do confinamento com vários parâmetros tais como, tempo de descarga, voltagem de carga dos bancos de capacitores, impurezas, geometria do FRC formado e outros. Posteriormente, poderemos estudar também vários sistemas de supressão de instabilidades $n=2$ e fazer comparações entre eles, de modo a realizar um estudo detalhado sobre os métodos de supressão destas instabilidades numa única máquina.

Outros trabalhos propostos para o futuro no experimento TC-1 são: estudo do efeito da subida lenta do banco principal no plasma produzido, controle do campo reverso aprisionado, formação programada de FRC com espelhos magnéticos ativos, estudos de aquecimentos adicionais de plasma e prolongamento do tempo de confinamento, além de se continuar com o desenvolvimento de diagnósticos adicionais.