

BR 87 14688
INIS - BR -- 652



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE FÍSICA

RELATÓRIO TÉCNICO

GRUPO DE PLASMAS

PERÍODO: NOVEMBRO/1984 a JULHO/1985

CAMPINAS

RELATÓRIO

GRUPO DE PLASMAS

PERÍODO: NOVEMBRO/1984 A JULHO/1985

GRUPO DE PLASMA

Constituição do Grupo

Paulo Hiroshi Sakanaka	Professor Titular
Helmut Karl Böckelmann	Professor Adjunto
Aruy Marotta	Professor Livre Docente
José Busnardo Neto	Professor Livre Docente
Munemasa Machida	Professor Assistente Doutor

Alunos de Pós-Graduação

Milton Eiji Kayama	(Doutoramento)
Roberto Yzumi Honda	(Doutoramento)
Altair Souza de Assis	(Doutoramento)
Antonio Carlos de Jesus Paes	(Doutoramento)
Ana Maria Hilsdorf Marotta	(Doutoramento)
Hector Ramon Torres Silva	(Doutoramento)
Hisataki Shigueoka	(Doutoramento)
Yoshiyuki Shigueoka	(Doutoramento)
Luiz Carvalho Braga	(Doutoramento)
Antonio José Balloni	(Doutoramento)
Conrado Siqueira Simão Zenun	(Mestrado)
Delton de Oliveira Campos	(Mestrado)
Magno Pinto Collares	(Mestrado)
Newton Luís Pires Mansur	(Mestrado)
Vladimir Henrique Baggio Scheid	(Mestrado)

Pessoal de Suporte Técnico/Administrativo

Augusto Fidehati Iha	Técnico Especializado
Blandina Vieira Marcão	Oficial de Administração
Alma Valquíria Breda	Oficial de Administração
Cristina Ap. Villaverde Haszler	Oficial de Administração
Douglas Cioban	Técnico Especializado
Sanclair Assis Dini	Técnico Especializado
Maurício Shibana	Técnico de Laboratório
Antonio Ferreira Lima Júnior	Técnico de Laboratório

I N D I C E

- I - Introdução
- II - Tupã I
 - A. Infra-estrutura
 - B. Desenvolvimento das experiências
 - C. Dados experimentais
- III - Outros Experimentos
- IV - Maçarico de Plasma
- V - Conferências
- VI - Teses Defendidas
- VII - Lista de Publicações
- VIII - Comunicações

I - INTRODUÇÃO

Este relatório se refere as atividades de pesquisa do Laboratório de Plasma da Unicamp no período de Novembro de 1984 a Julho de 1985.

O período foi bastante produtivo tanto do ponto de vista experimental apesar de sérias dificuldades financeiras surgidas devido a inflação e a falta de compromisso de parte da Comissão Nacional de Energia Nuclear. A pesquisa de natureza teórica está correndo com uma boa produtividade científica.

Na parte experimental, houve um desenvolvimento maior com relação às técnicas de diagnóstico, podendo agora analisar com bastante profundidade a fase de implosão do θ -Pinch. Desenvolveu-se também a sonda de pressão, analisador eletrostático de energia dos ions e espectroscopia de plasma produzido por laser. Estamos na fase final de construção o laser de CO_2 e o Toróide Compacto.

O resultado de todas estas atividades é medido pelas contribuições feitas nas conferências de Plasmas em Trieste, Vácuo no Rio de Janeiro e SBPC, em Belo Horizonte.

II - TUPÃ I

Foram desenvolvidos dentro do projeto Tupã, vários trabalhos relacionados à infra-estrutura e projetos de pesquisa no período em consideração.

Dividimos em três partes para uma descrição mais detalhada, primeiramente em relação a infra-estrutura, depois os desenvolvimentos dos itens relacionados no cronograma expostos no projeto de pesquisa e finalmente dados experimentais.

II.A - Infra-Estrutura

Desenvolvimento da infra-estrutura pode ser divididos nos seguintes itens:

- 1) construção de uma sala ótica e eletrônica fina;
- 2) montagem de bancadas para osciloscópios na sala de diagnósticos;
- 3) sistema fechado de água no laboratório;
- 4) uma sala de capacitores;
- 5) início de montagem da sala de eletrônica;

que serão discutidos a seguir.

- 1) Devido a existência no laboratório de vários equipamentos de alto custo e sensibilidade eletrônica, e a máquina tupã no seu regime de trabalho emitir elevados níveis de ruído eletromagnético associados a necessidade de possuir uma sala ótica para trabalhos com laser, espectrômetros e detetores tipo OMA, foi construído na sala adjacente ao laboratório onde se situa a máquina Tupã, uma sala especial do tipo gaiola de Faraday com paredes e portas isoladas eletricamente das paredes do laboratório, com alimentação através de filtros de linha e de isolamento. As paredes

de blindagem foram feitas com folhas de ferro zincados de 2 mm de espessura que mostrou ótima blindagem contra pulsos rápidos de até 100 μ seg que as máquinas em operação no laboratório possuem.

Nesta sala estão instalados os seguintes instrumentos e experiências: espectrômetro Jarrel Ash. de 1 metro de comprimento com conexão de fibras ópticas, detetor multicanal OMA, Imacon (fotografias rápidas), laser de rubi com seus detetores e a experiência de plasma produzida por laser, todos em operação satisfatória.

- 2) Com a aquisição por empréstimos e doação das Universidade Americanas de 7 osciloscópios Tecktronix houve necessidade de montagem de acesso para estes instrumentos na sala de diagnósticos que já havia sido montado no projeto anterior. Com esta instalação temos atualmente nove osciloscópios com capacidade de receber 17 sinais independentes e simultâneos provindos de vários métodos de diagnósticos que estão em funcionamento atualmente na máquina Tupã.
- 3) O sistema fechado de água (Garcia & Bassi) no laboratório foi instalado nos fins de 1984, com isso podemos ter maior segurança nos funcionamentos de vários aparelhos tais como, sistema de refrigeração das bombas de vácuo difusora, laser de Rubi e CO₂ e maçaricos de plasma. A tubulação de água corre em todo o laboratório e poderá ter acesso em vários pontos também para quaisquer outros instrumentos que no futuro haja necessidade de refrigeração.
- 4) Sala de capacitores: com a construção da máquina Toróide Compacto que possui 4 sistemas de bancos de capacitores num total de 30 capacitores de alta voltagem (até 100 kV) e capacitância de (- 1 μ F), com chaves de ignição e interrupção tipo (Crow-Bar) inteiramente construído na UNICAMP, foi necessário construir por mo

tivos de segurança e ruído acústico, uma sala adjacente de (24m²), ao atual laboratório para que todo o sistema de armazenamento de energia seja confinado em um lugar. Com isto não só a segurança foi redobrada mas também ganhou-se um espaço a mais que já vem se tornando crítica no atual laboratório. A conexão entre os capacitores e o Toróide Compacto em si, é feita por cabos coaxiais de alta tensão adquiridos na Pirelli-KMP.

- 5) Como a maioria dos instrumentos eletro/eletrônicos estão sendo confeccionados no nosso laboratório, estamos tentando no andar superior do laboratório, montar uma sala de eletro/eletrônica que nos permita um trabalho mais rápido e prático.

Esta sala ainda está em fase de montagem e esperamos concluir o mais rápido possível.

II.B - Desenvolvimento das Experiências

Em relação aos itens mencionados no cronograma, expostos no projeto de pesquisa, iremos analisar item por item de acordo com os desenvolvimentos sucedidos nestes últimos dois anos.

- Operação a 100 kV

O Tupã I, durante o período do projeto foi operado à carga de 50 kV. Devido a vários problemas apresentados a seguir e melhor conhecimento da máquina necessária nessa tensão resolvemos adiar a operação a 100 kV para futuro. O sistema Tupã nas condições de operação a 50 kV apresentouos seguintes problemas ao longo do período de janeiro de 1984 a julho de 1985.

- 1) A chave de ignição denominada "rail-gap", que são quatro chaves em paralelo, estão inseridas dentro de uma caixa de acrílico (dimensão: 45 x 21 x 15 cm) e pressurizadas a - 40 psi com uma mistura de gás - SF₆ e Argônio.

Esta mistura pressurizada é necessária para se obter uma descarga rápida e limpa com espaçamento entre eletrodos com distâncias bem pequenas (~ 5mm) que diminui sensivelmente a indutância total do sistema. Uma das desvantagens desta mistura, é que embora o gás no início seja inerte, após a descarga a sua estrutura molecular é quebrada formando um gás altamente corrosivo. Normalmente para se confinar este gás dentro da caixa de acrílico, é utilizado uma borracha de silicone especial importada dos Estados Unidos da América. Tentamos utilizar um material similar nacional, porém devido a alguma diferença que ainda desconhecemos, houve um maior efeito de corrosão nesta borracha de vedação, o que acarretou uma fuga do gás e consequente despressurização em uma das quatro caixas que sofreu um impacto maior na descarga, danificando a caixa de acrílico que foi necessário ser substituída por uma nova, confeccionada com uma certa dificuldade na Oficina Mecânica Central do Instituto de Física, em três meses.

- 2) Os sistemas auxiliares de carga, que são pré-ionização e de polarização, estão conectados em paralelo com o principal e que esporadicamente uma carga de fuga é transmitida principalmente ao sistema de polarização que operam com a chave de ignição tipo "Ignitron" que não suportam excessivas cargas reversas e tensões mecânicas. Durante o decurso das operações foram danificadas 3 Ignitrons, principalmente a tensões mecânicas na base do suporte. Este problema foi contornado modificando completamente o sistema de suporte dos ignitrons e de cabos de transmissões que tensionavam as placas de sustentação dos ignitrons, após esta modificação não houve mais este tipo de problema .
- 3) Devido a uma falha na chave de ignição tipo "rail gap" do banco principal, onde toda a descarga foi efetuada sem ser acionada por gatilho central, houve uma danificação completa de uma das quatro

caixas de acrílico e metade da placa de sustentação de resistores que se situa logo depois das caixas de chaves. Foi necessário confecção de nova caixa e reposição da placa trazeira (2 x 1 m) num tempo recorde de 1 mês.

- 4) Na tentativa de colocação de novas sondas magnéticas de fluxo excluído adicionado ao mau funcionamento, novamente da chave de ignição, houve uma descarga entre o tubo de vidro de produção de plasma e o solenóide principal, o que resultou na quebra do tubo de vidro. Após este problema toda parte de ignição, placa coletora ligada aos capacitores, solenóide e isolação em geral foram desmontados e checados parte por parte por membros, professores, estudantes de pós-graduação e técnicos da equipe. Devemos ressaltar aqui, que em operação de máquinas deste porte é normal ter este tipo de problemas, devendo nestes casos, a equipe estar preparada tanto financeiramente como pessoalmente, com capacidades profissionais suficientes para montar, desmontar e confeccionar novas peças onde for possível de serem feitas com tecnologia nacional.

- Operação com Campo Perverso

Este item foi efetuado com pleno sucesso. Os dados referentes a esta operação serão apresentados logo a seguir nos resultados experimentais.

- Operação com Deutério

Este item junto com a de 100 kV será prorrogado para futuro próximo após um estudo mais minucioso na operação a 50 kV, com gás Hélio.

- Vedação Sólida

A vedação sólida nas extremidades será instalada após um estudo exaustivo do sistema Tupã a 50 kV, usando o gás Hélio. As partes para a sua montagem já foram confeccionadas (Fig. 1).

- Rádio-Frequência: 23 kW, 30 MHz

Foi instalado inicialmente para pré-ionização uma rádio-frequência de 17 MHz e 30 Watts que está em funcionamento satisfatório. Devido a utilização de uma RF de potência mais alta ser mais interessante a operação da máquina com voltagem mais alta (100 kV) e com Deutério, decidimos prorrogar este item junto com outros dois para o futuro.

- Diagnóstico com Imacon

Na câmara ultra-rápida Imacon, devido a sua eletrônica sensível aos ruídos, foi construído uma caixa metálica (latão) de proteção com acesso por portas e visores, como uma gaiola de Faraday, esta proteção até o momento está funcionando satisfatoriamente e o diagnóstico com Imacon está de acordo com o cronograma.

- Diagnóstico Eletromagnético

Foram efetuados vários diagnósticos eletromagnéticos. Uma sonda múltipla foi inserida no plasma e seus dados foram analisados, uma sonda de fluxo excluído também está sendo inserida na máquina. Um programa computacional/experimental foi elaborado e será apresentado na parte de resultados experimentais.

- Espectroscopia Ótica

O espectrômetro foi instalado e calibrado na sala ótica. Os dados óticos do Tupã serão recolhidos por meio de fibras óticas e

transmitidos para a sala ótica que após a análise espectrométrica serão analisados por OMA que pode tanto expor graficamente num graficador X-Y ou em câmeras fotográficas. Toda parte óptico/eletrônica está montada e estamos atualmente na fase de tiragem de dados do Tupã.

- Analisador de Energia dos Ions

O analisador eletrostático de energia dos íons está montado e está em fase de testes e calibração. Após a calibração será instalado em uma das extremidades do sistema Tupã. As peças são todas em aço inox e o vácuo (10^{-6} Torr) é obtido através de 2 bombas mecânicas e 2 bombas difusoras

- Tupã II

Projeto Conceitual/Construção

Devido ao corte do projeto inicial, esta parte foi prorrogado para o futuro, em comum acordo com a FINEP na espera da assinatura do convênio.

II.C - Dados Experimentais

Durante o tempo de funcionamento do Tupã obtivemos resultados experimentais através de sondas magnéticas múltiplas inseridas no plasma. Estes resultados foram analisados por um código numérico utilizando algumas equações de MHD em 2 dimensões. Determinando assim uma descrição global da dinâmica do plasma e estimando parâmetros do plasma como densidade e temperatura.

Como resultados preliminares pode-se observar, das medidas realizadas, o desenvolvimento das instabilidades, provavelmente do tipo ruptura (tearing modo), oscilações radiais da coluna de plasma e também oscilações axiais em configuração reversa. Foi visto também que este método de análise numérica de resultados experimentais pode reduzir de forma significativa os trabalhos experimentais.

Na figura 2 são expostos alguns resultados típicos da descarga monitorada pelas sondas magnéticas em duas posições radiais e uma descarga com banco de polarização, e o principal com plasma e na última foto uma fotografia tirada por Imacon.

Na figura 3 estão mostrados os dados experimentais com interpolação cúbica em intervalos de até 10 nseg.

Utilizando estes dados podemos aplicar um método computacional para cálculo do fluxo magnético em várias posições e tempos como é mostrado na figura 4, confirmado adiante. Através destes dados experimentais e computacionais um modelo mais sofisticado é desenvolvido utilizando um código tridimensional para mostrar a configuração da densidade de corrente azimuthal na figura 5. Nota-se na figura 4 ainda que aos $t = 0,7 \mu\text{seg}$, a instabilidade de ruptura que está começando a desenvolver o que continua em configurações reversas até $t = 1,6 \mu\text{seg}$.

Um diagrama de bloco é mostrado na figura 6 para melhor entendimento deste processo, que reduz, e propicia uma visão bem melhor dos dados experimentais até então obtidos.

Uma das aplicações dos resultados das fotografias ultra-rápidas e a sua utilização para uma estimativa de densidade e temperatura do plasma, foi utilizado um microdensitômetro na fotografia tirada pela Imacon e estudada a evolução temporal da luz emitida durante a implosão do plasma. Um destes dados é mostrado na figura 7,

Através destas técnicas acima expostas, podemos estimar os seguintes parâmetros de plasma:

Temperatura iônica: $300 \text{ eV} < T_e < 1200 \text{ eV}$

Temperatura eletrônica: $\sim 150 \text{ eV}$

Densidade iônica: $\sim 2,8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

Densidade eletrônica: $\sim 2,0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

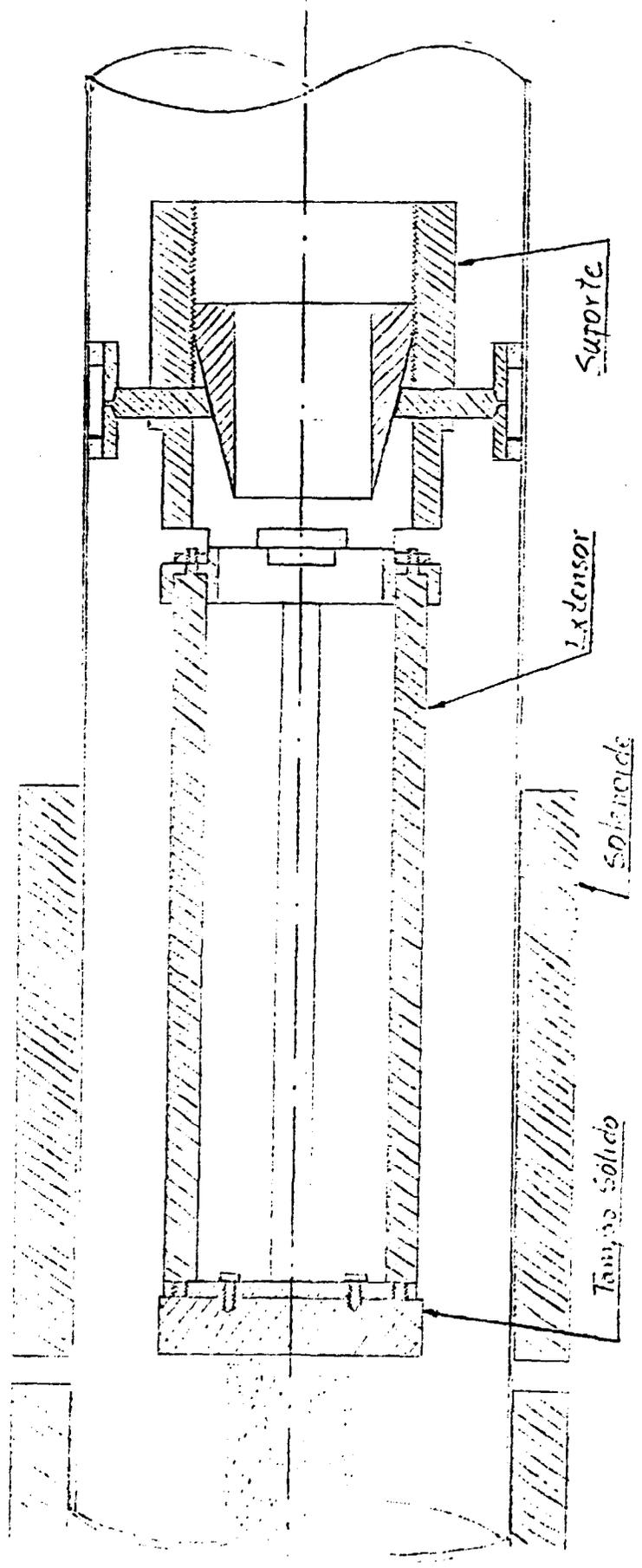
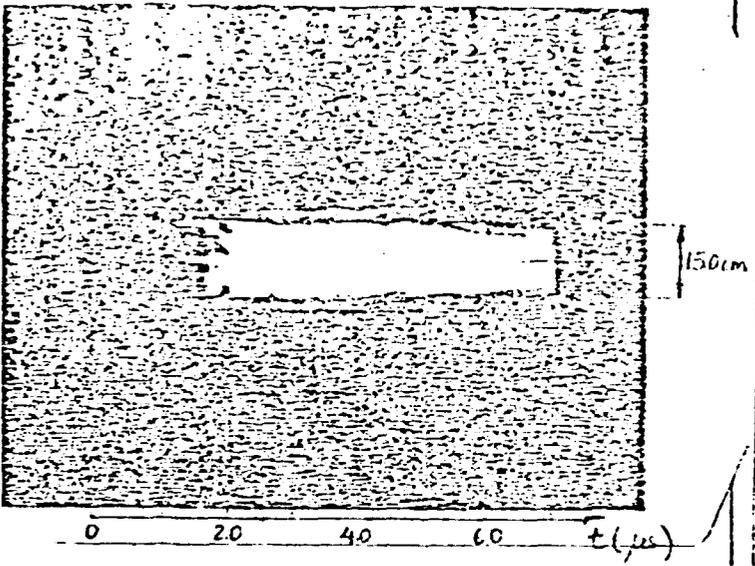
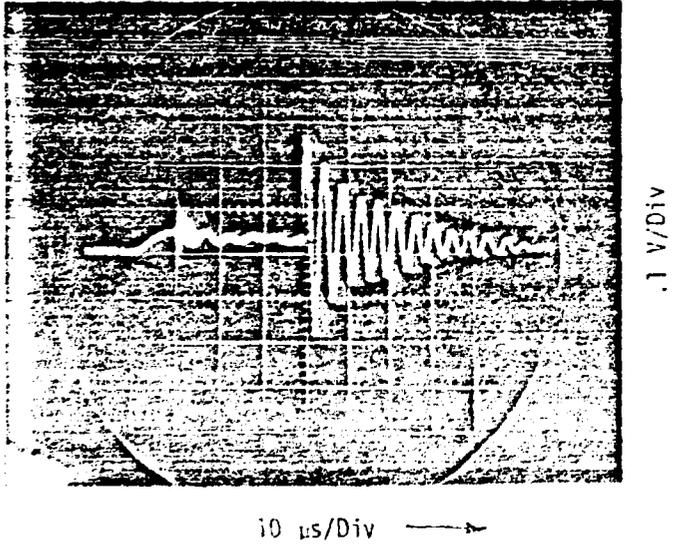


Figura 1 - Suporte para vedação sólida

(c)



(b)



(a)

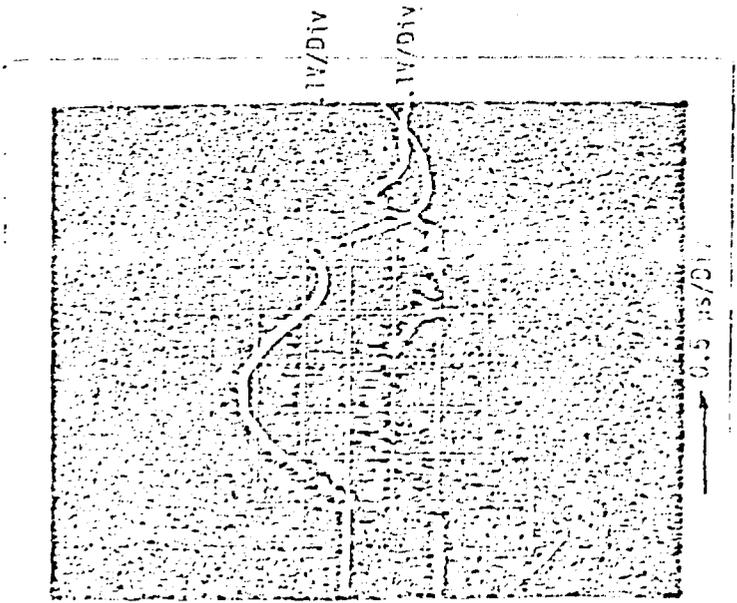


Figura 2

(a) Sinais das bandas magnéticas em r=5,0 e 0,0cm; (b) perfil temporal na descarga do sistema de polarização, após-ionização principal; (c) registro fotográfico da dinâmica radial do plasma pela Imacon

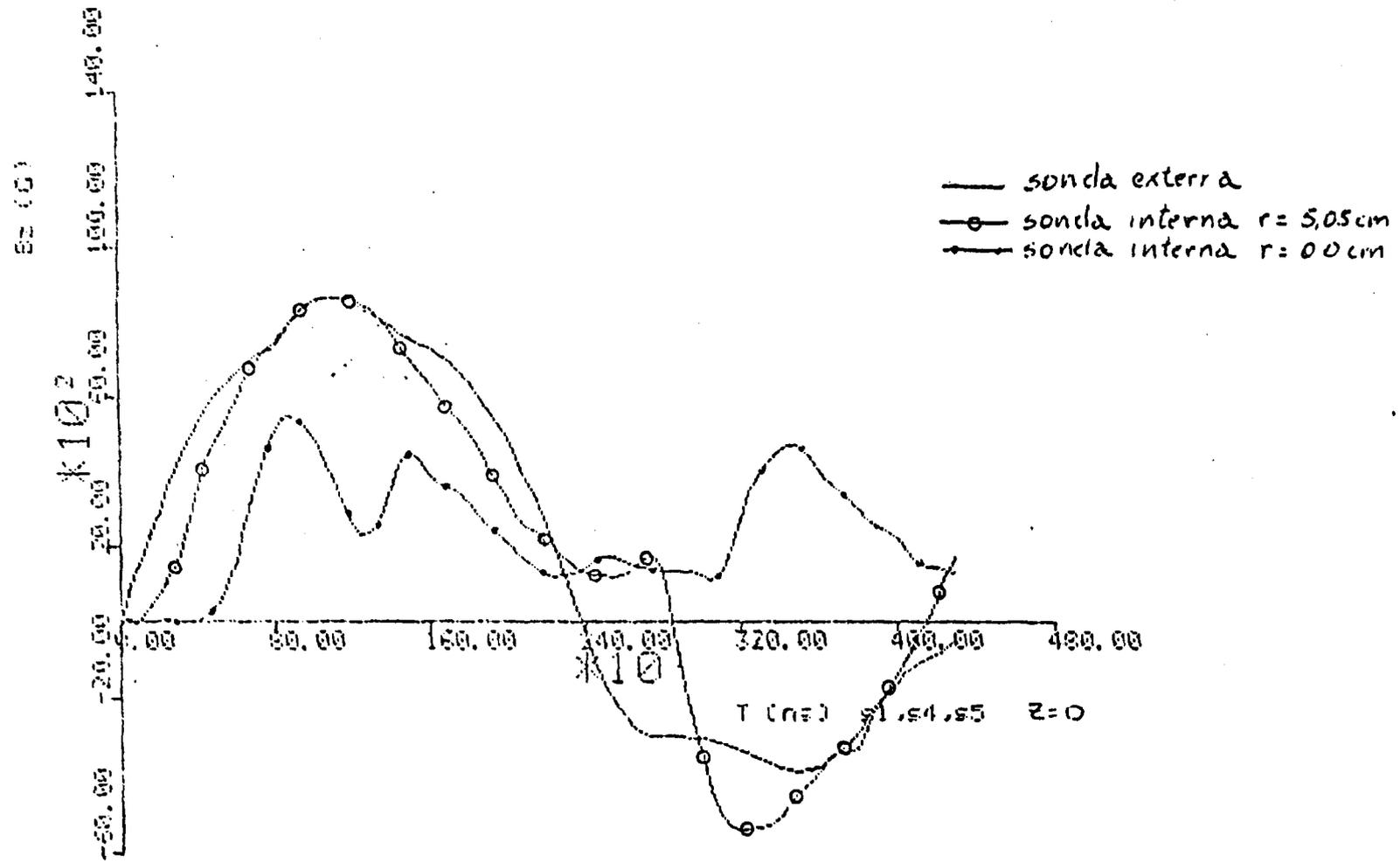


Figura 3 - Perfis de sondas magnéticas

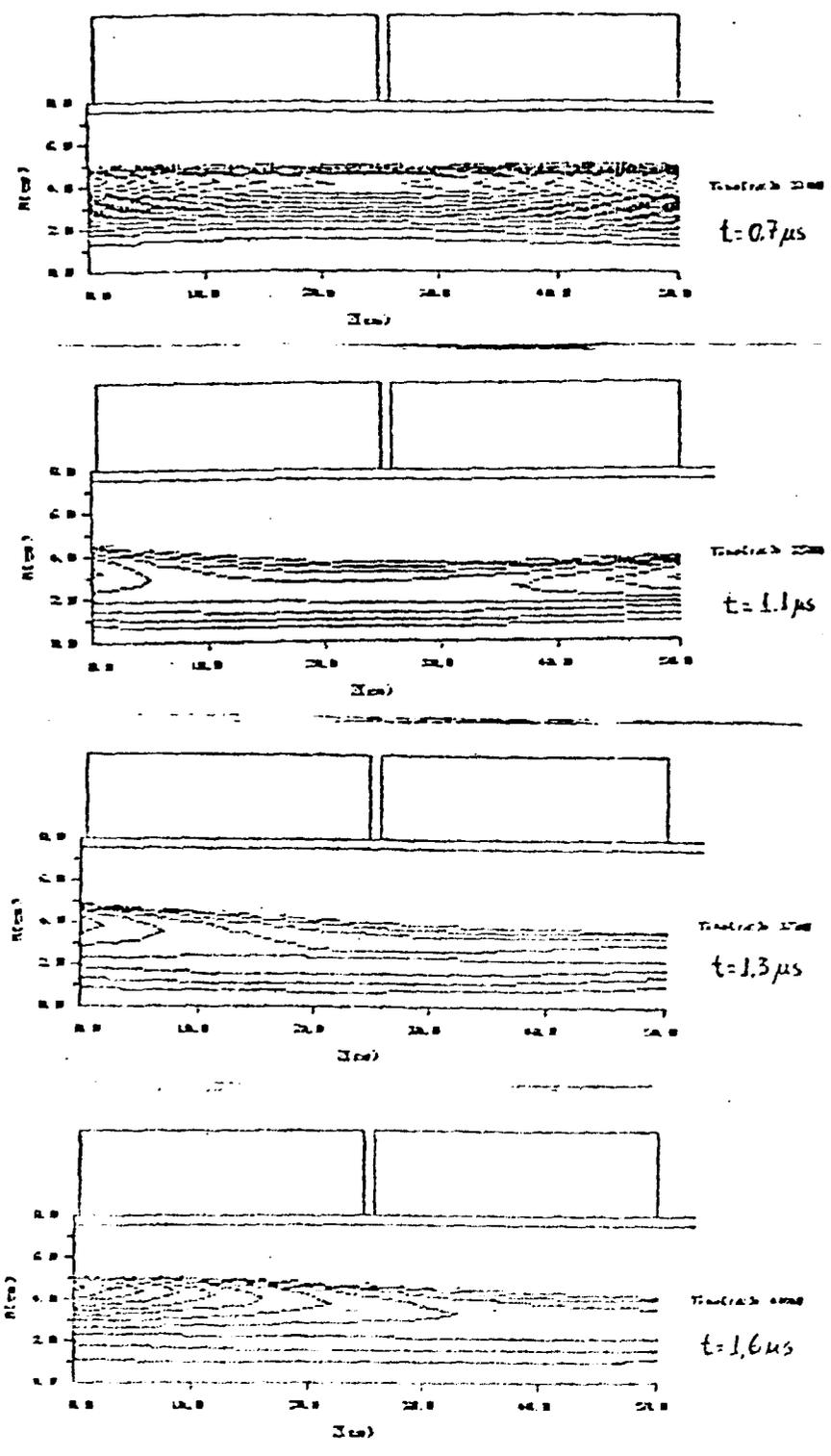
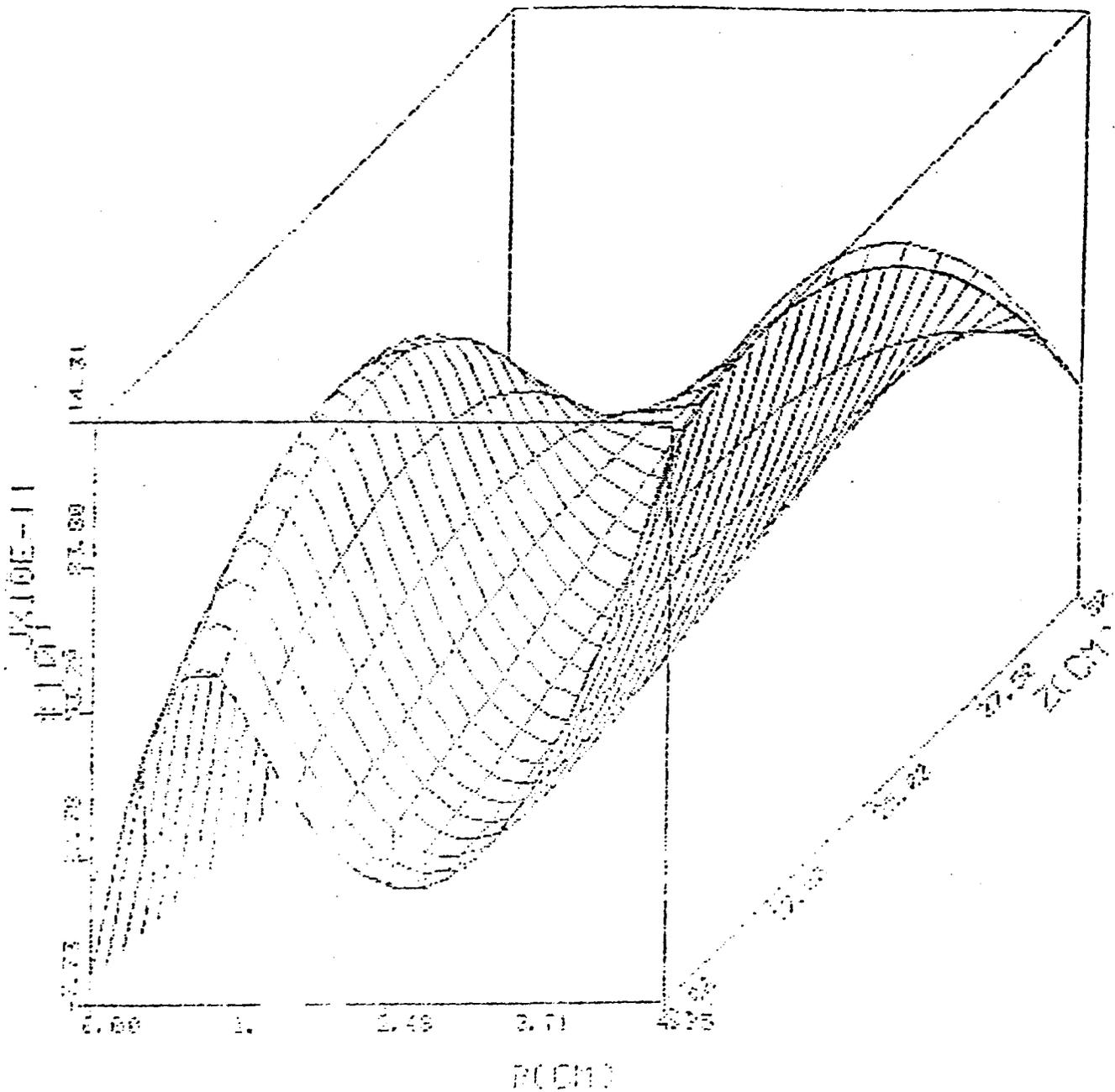


Figura 4 - Evolução das linhas de fluxo ($z=0$ no meio do solenóide)



TEMPO:

GAS: HE

PRESS: 0: 811 TORR

Figura 5 - Perfil tridimensional da corrente J_θ

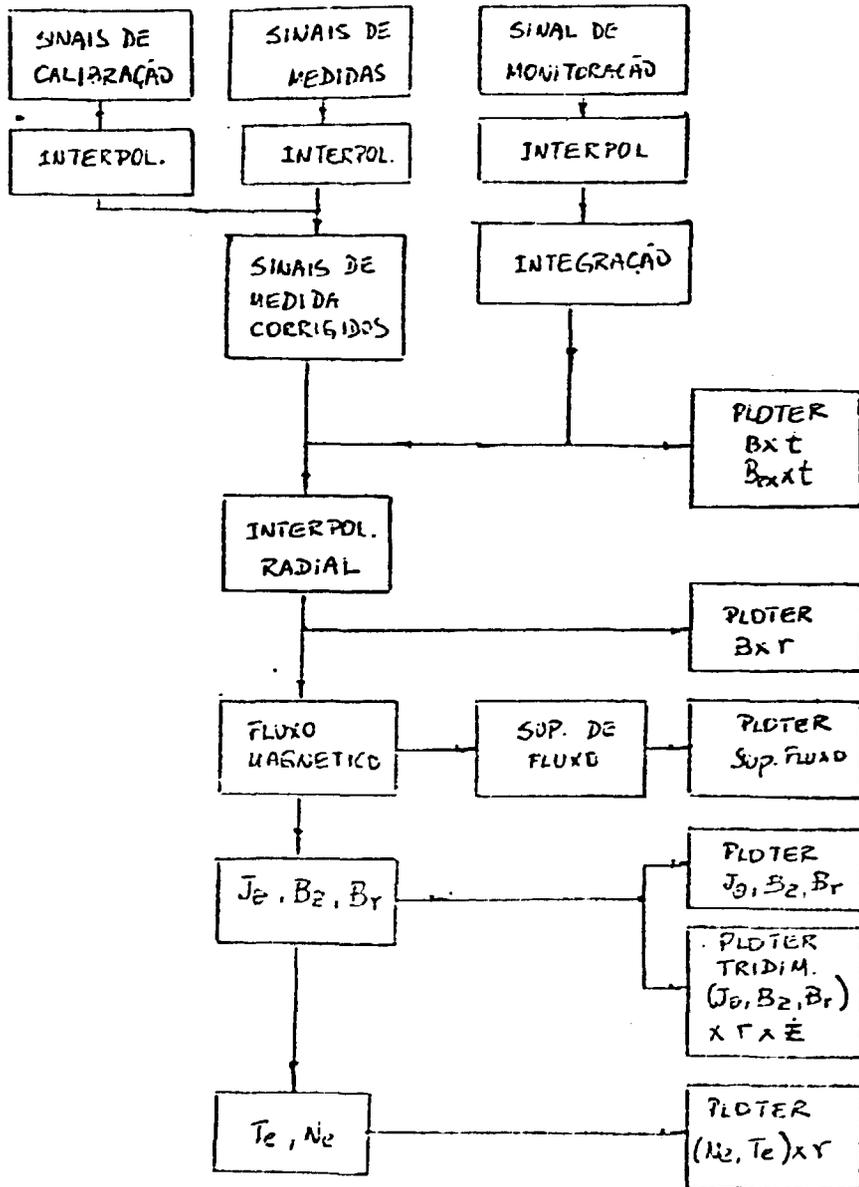


Figura 6 - Diagrama de blocos do programa para análise das medidas de sondas magnéticas

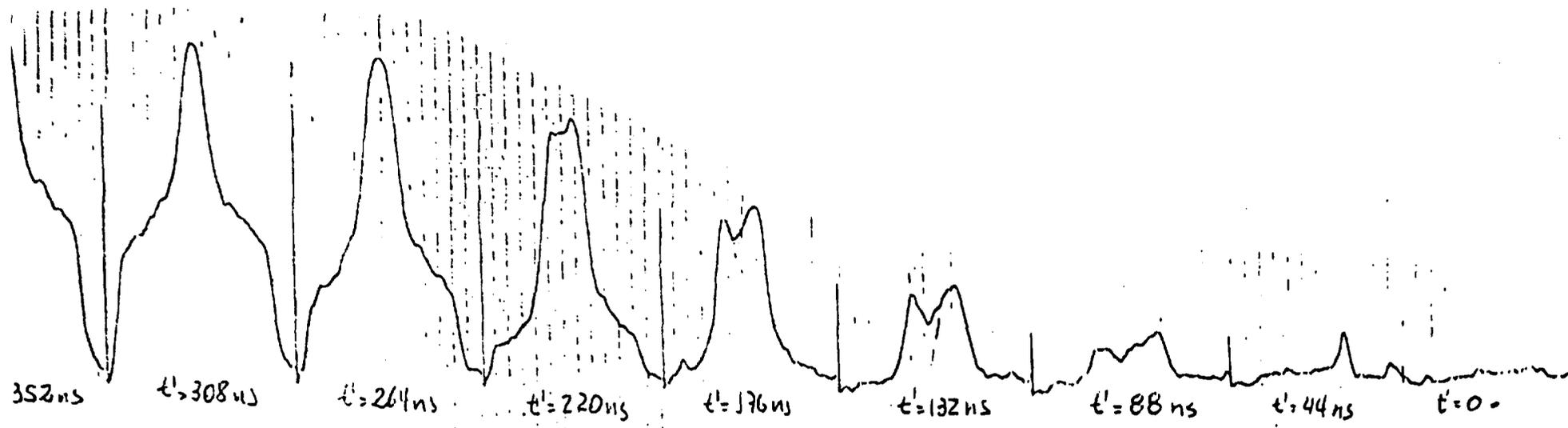


Figura 7 - Evolução da luz emitida durante a implosão do plasma

III - OUTROS EXPERIMENTOS

Paralelamente ao Theta-Pinch Tupã, temos no laboratório outras experiências em andamento: Toróide Compacto I e Plasma Produzido por Laser.

- O Toróide Compacto iniciou a sua montagem nos fins de 1983 porém, devido a problemas financeiros não foi possível ter um andamento sensível em 1984. Porém, com a ajuda da FAPESP em 1985, foi possível retornar às atividades que relatamos a seguir.

Após a construção da sala de capacitores foram montados na sala os quatro bancos de capacitores dos quais 2 bancos estão prontos e um deles já foi testado com sucesso. Esperamos que até o final do ano para o começo do ano de 1986, estejam todos os bancos em pleno funcionamento.

O solenóide do TC-I já está montado e o sistema de vácuo em funcionamento perfeito com pressão de base de $\sim 10^{-6}$ Torr. Estamos instalando no momento uma fonte de RF para pré-pré-ionização, sistema elétrico para o disparo e vários resistores de carga e descarga. Todas as chaves foram construídas na UNICAMP e estamos testando no momento o "Crow-Bar", a chave de interrupção, que planejamos no futuro também ser instalada na máquina Tupã. Crow-Bar é uma chave que poderá controlar a descarga interrompendo-a no tempo que o operador desejar e não deixar o sistema oscilar como vem acontecendo no momento com a máquina Tupã. Este tipo de chave é novidade no Brasil, e o conhecimento adquirido nesta técnica será de grande utilidade para o grupo.

Após terminar a montagem será instalado o sistema de diagnósticos que constará de sondas eletromagnéticas, sondas piezoelétricas, copos de Faraday e espectroscopia que esperamos iniciar em Janeiro de 1986.

Estudo de um Plasma produzido por Raio Laser em um sólido de Nióbio (Nb).

D.O. Campos e H.K. Böckelmann

Grupo de Plasma - IFGW - UNICAMP

SISTEMA DE VÁCUO

BOMBA DE ADSORÇÃO

USADA PARA PRÉ VÁCUO
RESFRIAMENTO - NITROGÊNIO LÍQUIDO
TEMPO PARA RESFRIAMENTO - 10 min
TEMPO PARA BOMBEAMENTO - 10 min
PRESSÃO FINAL - 10^{-3} Torr

BOMBA IÔNICA

PRESSÃO MÍNIMA PARA OPERAÇÃO - $5 \cdot 10^{-2}$ Torr
PRESSÃO MÍNIMA PARA SEGURANÇA - $5 \cdot 10^{-4}$ Torr
PRESSÃO FINAL NO SISTEMA - $7 \cdot 10^{-7}$ Torr
TEMPO PARA PRESSÃO FINAL - ± 20 min (DEPOIS DE LIGADA
A BOMBA IÔNICA)

OBS.: DEPOIS DE FEITO O PRÉ-VÁCUO E ACIONADA A BOMBA IÔNICA, A VÁLVULA V¹ É FECHADA E A BOMBA DE ADSORÇÃO DESATIVADA

VANTAGENS DO SISTEMA: NÃO POSSUI VIBRAÇÕES MECÂNICAS
SEM PERIGO DE CONTAMINAÇÃO COM ÓLEOS

SISTEMA DE VÁCUO

CÂMARA - AÇO INOX

COMPRIMENTO INTERNO - 31 cm

DIÂMETRO INTERNO - 15,2 cm

JANELAS PARA OBSERVAÇÃO - 4

ENTRADA PARA LUZ DO LASER COM LENTE PARA FOCALIZAÇÃO

SUPORTE PARA AMOSTRAS DE MATERIAIS SÓLIDOS

TUBULAÇÃO P/ VÁCUO

DIÂMETRO - 7 cm

COMPRIMENTO VERTICAL - 27,3 cm

COMPRIMENTO HORIZONTAL - 23,2 cm

VÁLVULAS - V1 (DIAFRAGMA)

V2 (BORBOLETA)

PEÇA P/ CONEXÃO COM A BOMBA IÔNICA

DIÂMETRO INTERNO - 7,0 cm

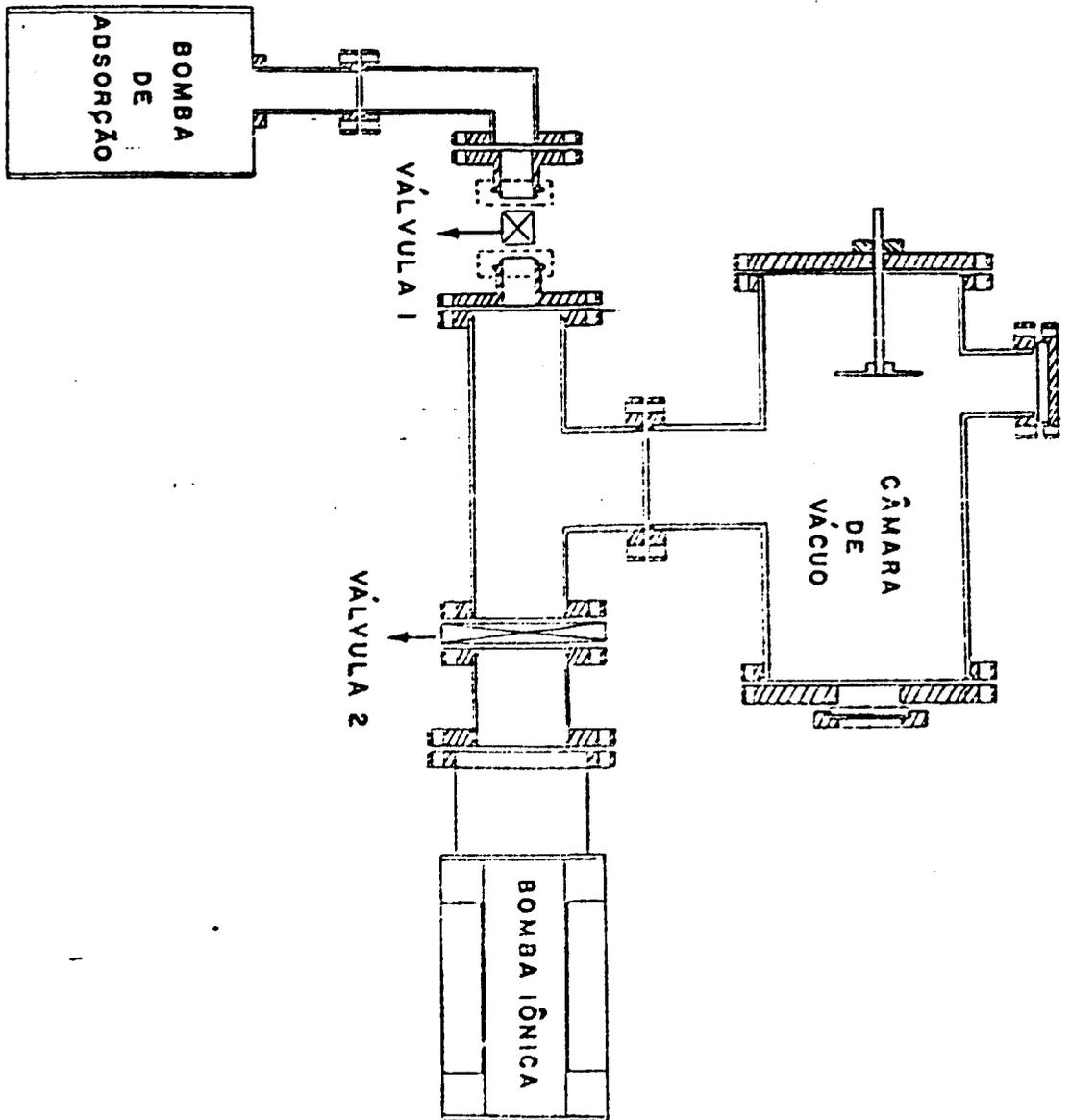
COMPRIMENTO - 7,3 cm

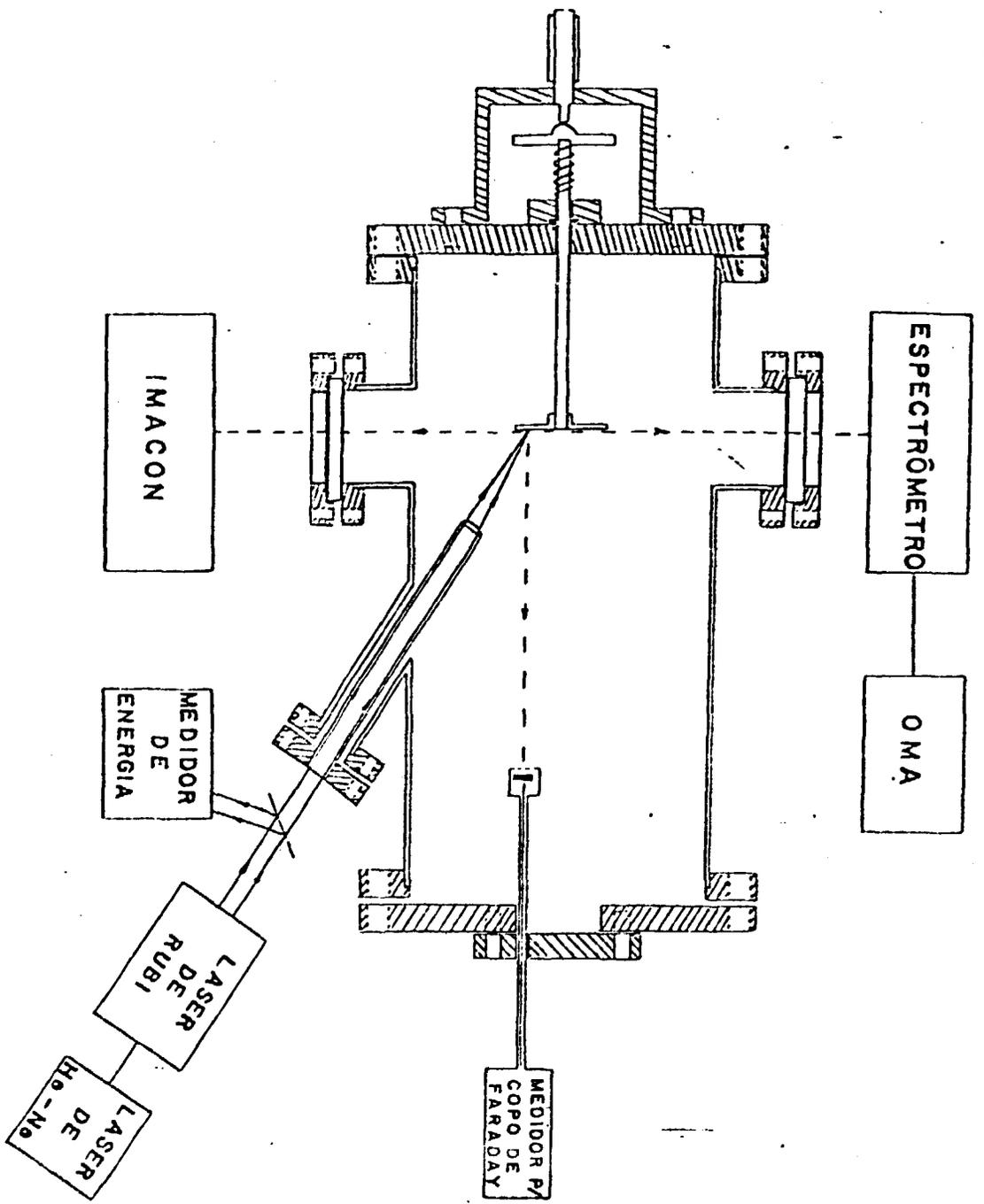
TUBULAÇÃO P/ BOMBA DE ADSORÇÃO

HORIZ.: 39,5 (di=25,7)+VÁLVULA V1+39,5(di=25,7)+62(di=35) (mm)

VERT. : 139 mm (ATÉ ENTRADA DA BOMBA)

ANÉIS DE BORRACHA - VITON





PRODUÇÃO DE PLASMA

LASER DE RUBI (HOLOBEAM SERIES 600)

COMPRIMENTO DE ONDA - 6943 Å

POTÊNCIA - ATÉ 250 MW

LARGURA DE PULSO - 40 ns

DIÂMETRO DO FEIXE - 9,5 mm

LENTE PARA FOCALIZAÇÃO - (DIST. FOCAL = 8cm)

REGIÃO FOCAL (CALCULADO)

COMPRIMENTO - $1,25 \cdot 10^{-2}$ cm

DIÂMETRO - $1,43 \cdot 10^{-3}$ cm

ÁREA DA SECÇÃO TRANSVERSAL - $1,61 \cdot 10^{-6}$ cm²

POTÊNCIA FOCALIZADA - 10^{13} W/cm²

SUPERFÍCIE SÓLIDA

CRISTAL DE NIÓBIO - 99,99 %

DENSIDADE CRÍTICA DO PLASMA - $2,3 \cdot 10^{21}$ cm⁻³

LASER DE He-Ne - USADO PARA FOCALIZAÇÃO E ALINHAMENTO

MEDIDOR DE ENERGIA - HADRON MODEL 102C

ESPECTRÔMETRO

SPEX 1702 - 3/4 meter Czerny-Turner Spectrometer
 REDE DE DIFRAÇÃO - 1200 ESTRIAS/mm
 BLAZED A 5.000 Å
 DETECÇÃO DA LINHA - OMA

OMA

FAZ MEDIDAS SIMULTÂNEAS DE INTENSIDADES DE LUZ UTILIZANDO UM DETECTOR DE 500 CANAIS.

O SINAL DA LINHA EMITIDO AO DETECTOR É DIGITADO NO CONSOLE DO OMA E ARMAZENADO EM UMA MEMÓRIA PARA SER APRESENTADO NO DISPLAY DE UM OSCILOSCÓPIO

- RESOLUÇÃO - 0,3 Å/CANAL

IMACON

-CÂMERA QUE REGISTRA EVENTOS LUMINOSOS EM INTERVALOS CURTOS DE TEMPO SOBRE FILMES COMUNS (POLAROID 47, DE 3.000 ASAS)

- OPERA EM DOIS MODOS DIFERENTES:

a) MODO "FRAMING"

AQUI, REGISTRA-SE O EVENTO EM UMA SEQUÊNCIA DE QUADROS (CADA QUAL CORRESPONDENDO A UM TEMPO DE EXPOSIÇÃO DE ALGUNS NANOSEGUNDOS NO FOTOCATODO)

-NA NOSSA CÂMERA PODEMOS TER UMA SEQUÊNCIA DE OITO FOTOS, COM AS SEGUINTE CARACTERÍSTICAS:

FREQUÊNCIA (FOTOS/S)	TEMPO "INTERFRAMING" (S)	TEMPO DE EXPOSIÇÃO POR FOTO (ns)
$5 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	40
$2 \cdot 10^6$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	100
$1 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	200
$5 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^{-5}$	400

IMACON (CONT.)**b) MODO "STREAK"**

NESTE MODO O REGISTRO É CONTÍNUO, COM UMA VARREDURA HORIZONTAL PARA REGISTRAR VARIAÇÕES TEMPORAIS, GERALMENTE DE PARTE DO SISTEMA OBSERVADO (USANDO-SE UMA FENDA)

- DISPOMOS NO LABORATÓRIO DE VARREDURAS DE 1 A 10⁴ S/cm

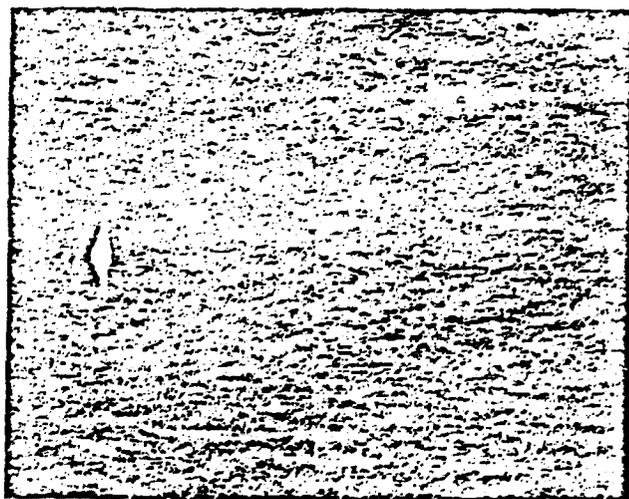
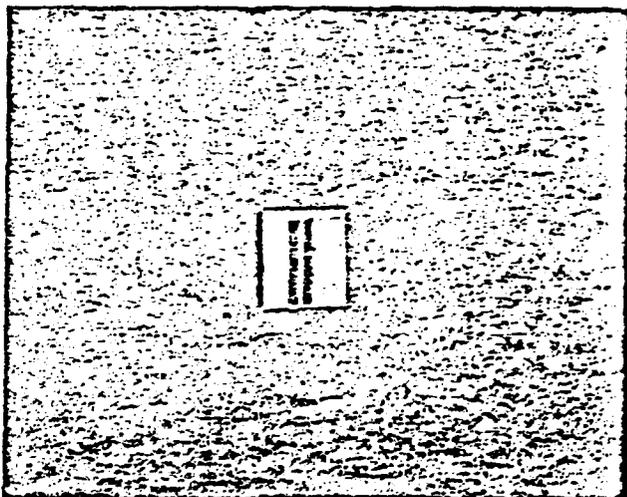
COPO DE FARADAY

SERÁ UTILIZADO PARA MEDIDAS DE ENERGIA DOS IONS DO PLASMA, PARA SEREM COMPARADAS ÀS MEDIDAS ESPECTROSCÓPICAS.

IMACON (CÂMERA CONVERSORA DE IMAGENS)

- DINÂMICA DE EXPANSÃO DO PLASMA

RESULTADOS PRELIMINARES USANDO-SE O MODO "STREAK"



ESCALA : 100 ns/mm (HORIZONTAL)

IDENTIFICAÇÃO DE LINHAS POR FOTOGRAFIA DO ESPECTRO

- FILME KODAK 2485 (ULTRA-RÁPIDO) ACOPLADO AO ESPECTRÔMETRO.
- FAIXA DE OBSERVAÇÃO SIMULTÂNEA : APROX. 400 Å
- = BOA RESOLUÇÃO
- IDENTIFICAÇÃO DE LINHAS FEITA COM O USO DE UM MICRODENSITÔMETRO.

MEDIDA DA TEMPERATURA DE ELETRONS

- EQUAÇÃO DE EINSTEIN-BOLTZMANN PARA INTENSIDADE ESPECTRAL :

$$I = \frac{N}{u} h\nu gA \cdot \exp(-E/kT)$$

N - DENSIDADE DE PARTÍCULAS

u - FUNÇÃO DE PARTIÇÃO

E - ENERGIA DO NÍVEL SUPERIOR

g - PESO ESTATÍSTICO DO NÍVEL SUPERIOR

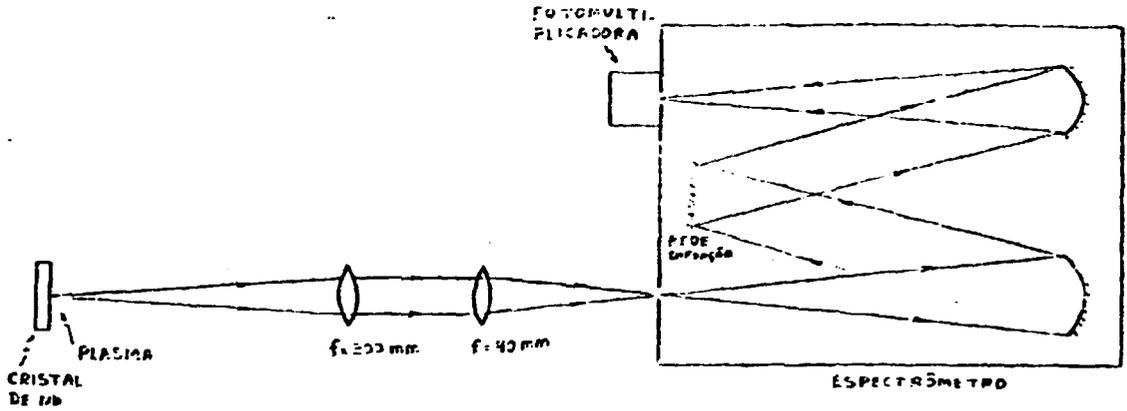
A - PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO EXPONTÂNEA

$$\frac{I\lambda}{gA} = \frac{N}{u} hc \cdot \exp(-E/kT) \quad \text{Ln}\left(\frac{I\lambda}{gA}\right) = \underline{\text{Cte}} - \frac{E}{kT}$$

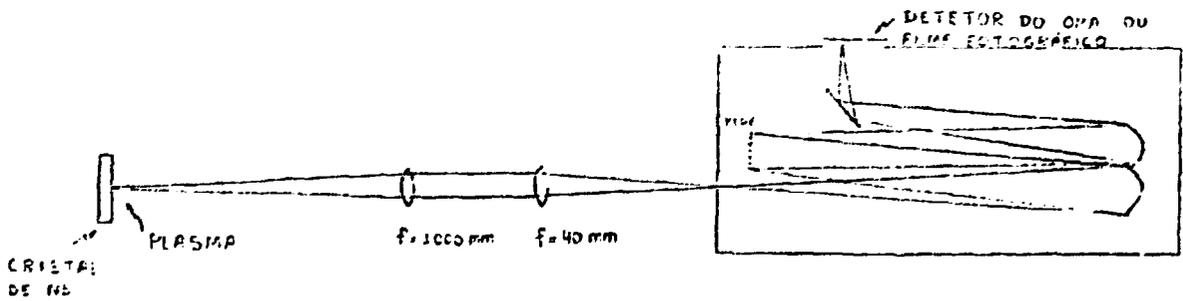
$$\text{Ln}\left(\frac{NhC}{u}\right) = \underline{\text{Cte}} \quad \text{PARA ÁTOMOS DE MESMA ESPÉCIE.}$$

A INCLINAÇÃO DA CURVA DE $\text{Ln}\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$ X E FORNECE $-\frac{1}{kT}$

- LINHAS: NbII - 4072,1 Å; 4156,7 Å; 4119,3 Å
NbI - 4123,8 Å; 4152,6 Å; 4100,9 Å; 4079,7 Å
- TEMPERATURA ESTIMADA : NbII - 0,5 eV
NbI - 0,2 eV



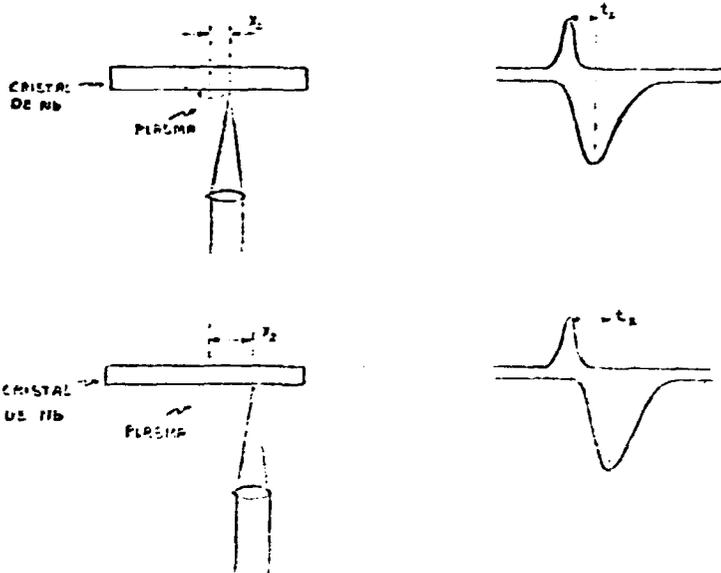
MONTAGEM: EVOLUÇÃO TEMPORAL DE UMA LINHA



MONTAGEM: REGISTRO DE ESPECTRO

EVOLUÇÃO TEMPORAL DE UMA LINHA DO Nb

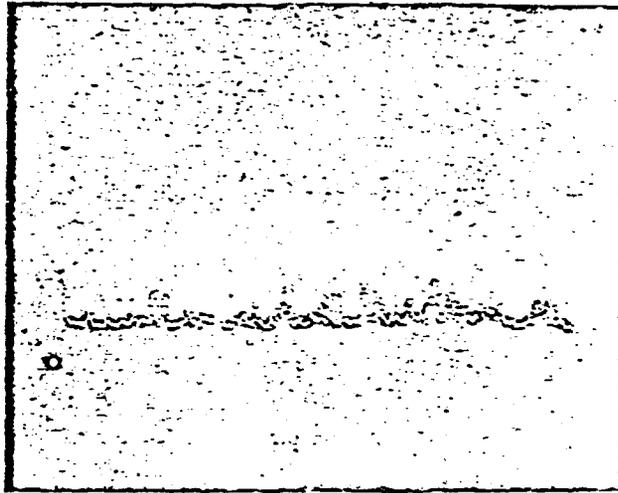
- SISTEMA DE LENTES : REDUÇÃO DE 7,5X
- FOTOMULTIPLICADORA : RCA C31034
- REGIÃO DE OBSERVAÇÃO NO PLASMA : APROX. 120 μ m



$$V = \frac{X}{-t} \quad ; \quad \bar{V} = 2 \times 10^6 \text{ cm/s} \quad , \quad \dot{V} = 2 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$$

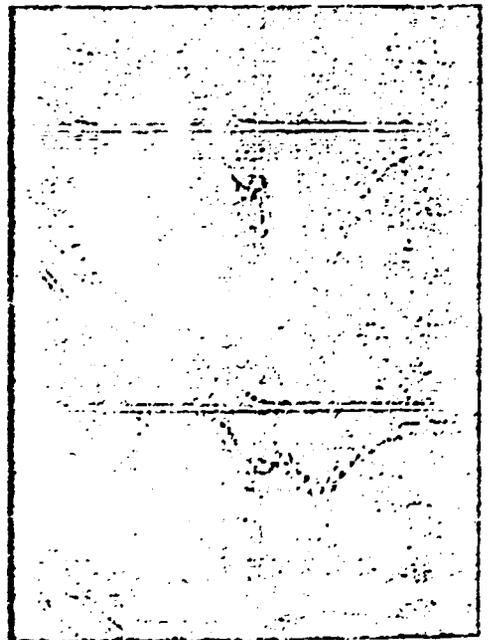
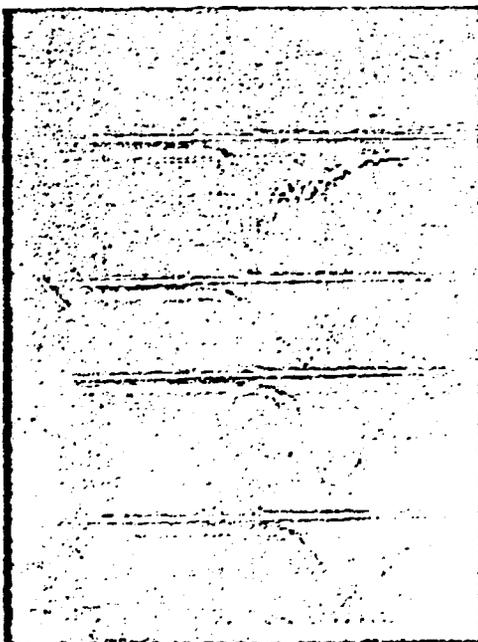
ENERGIA CINÉTICA DOS IONS E ÁTOMOS EXCITADOS: E 385 eV

- OBSERVAMOS TAMBÉM UM SINAL DE RADIAÇÃO CONTÍNUA DE NÍVEL BASTANTE ELEVADO NA REGIÃO DE FORMAÇÃO DO PLASMA, QUE TEM SEU MÁXIMO DESLOCADO DE APROX. 80 ns APÓS O MÁXIMO DO LASER.

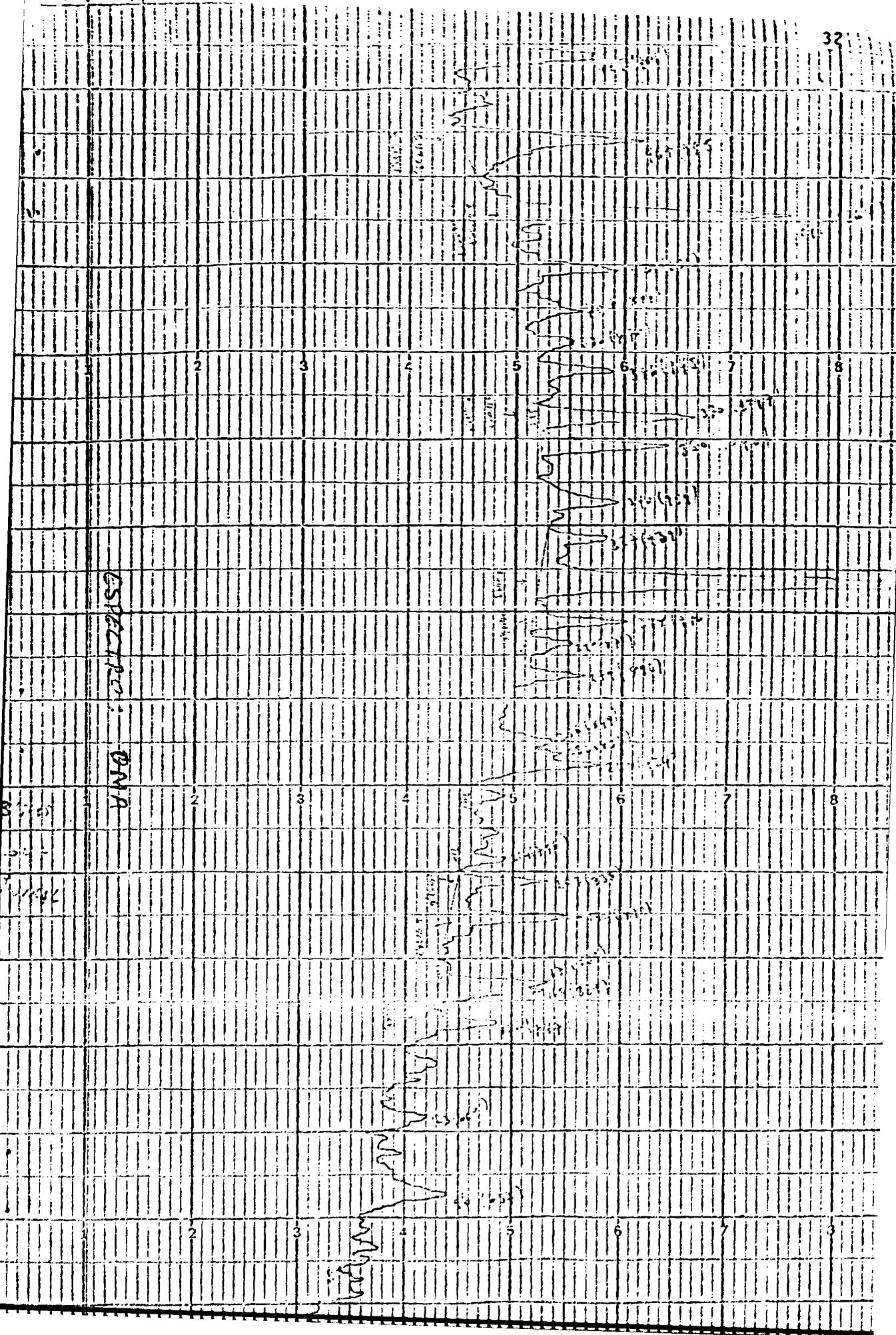


4815012

ESPECTRO : OMA - REGIÃO DE 4150A ± 75A

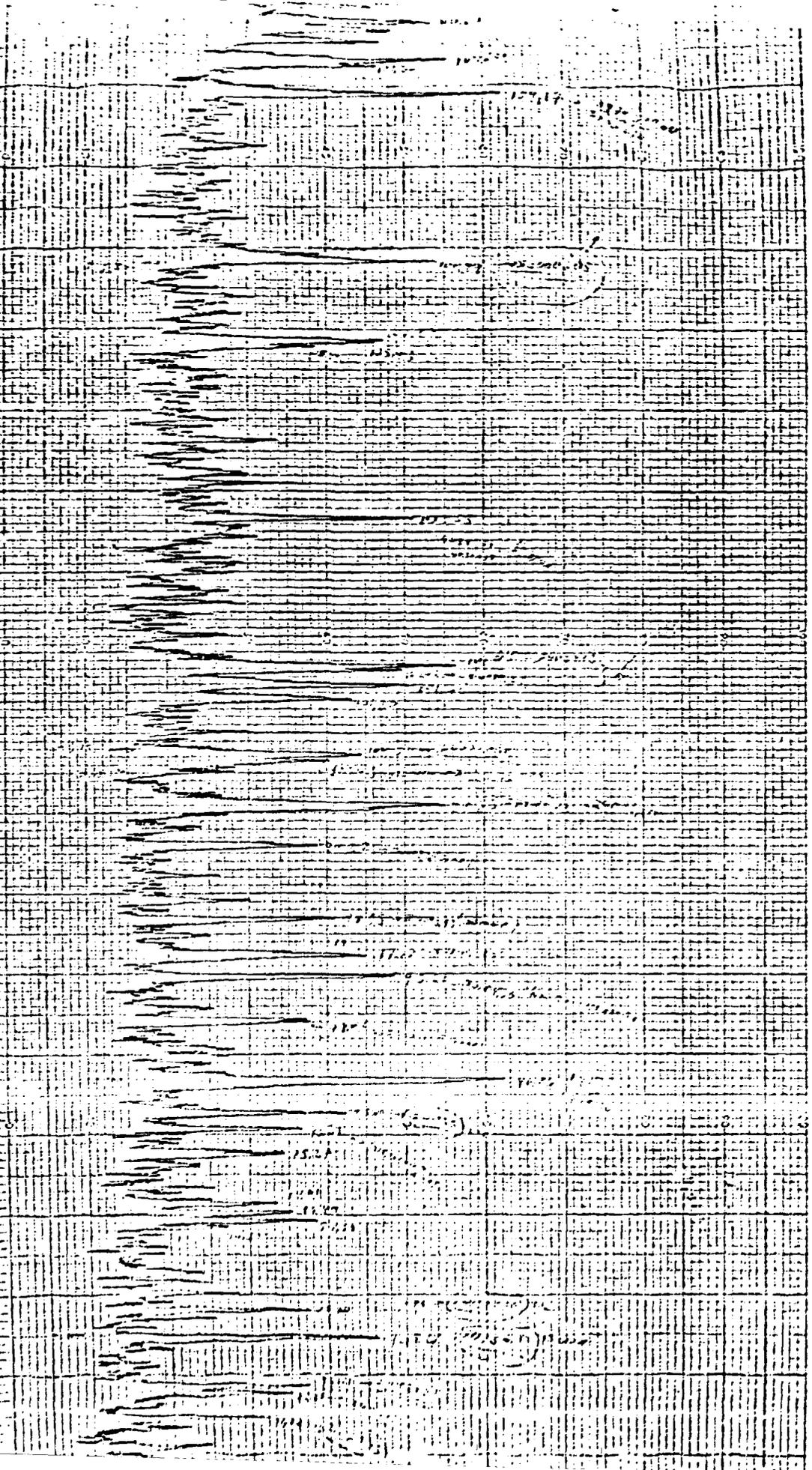


ESPECIALLY DNA



ESPECTRO

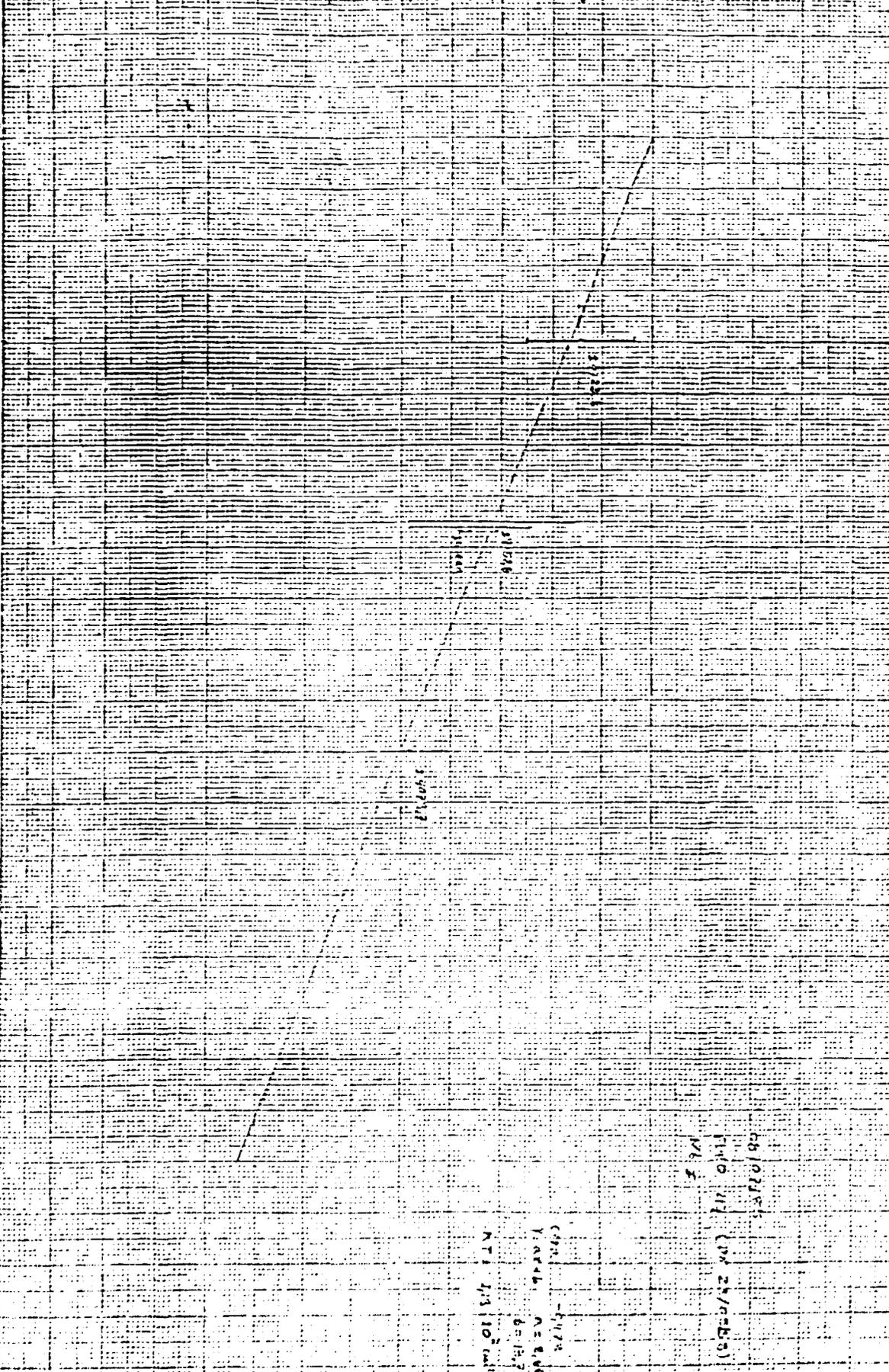
METROPO
POT-26
P.F.C.



2(2)13A

1.600
1.600
1.600
1.600
1.600
1.600
1.600

24725
24730
24735
24740
24745
24750
24755
24760
24765
24770
24775
24780
24785
24790
24795
24800
24805
24810
24815
24820
24825
24830
24835
24840
24845
24850
24855
24860
24865
24870
24875
24880
24885
24890
24895
24900
24905
24910
24915
24920
24925
24930
24935
24940
24945
24950
24955
24960
24965
24970
24975
24980
24985
24990
24995
25000



0810235
100 111 (DN 25/0-2.5)
106 F

CP111 -4474
1:0000 A=2.00
b=12.7
RTI 1/3 10' cut

E(cent)
1000 10 cut 1000

2. (x 2/30)

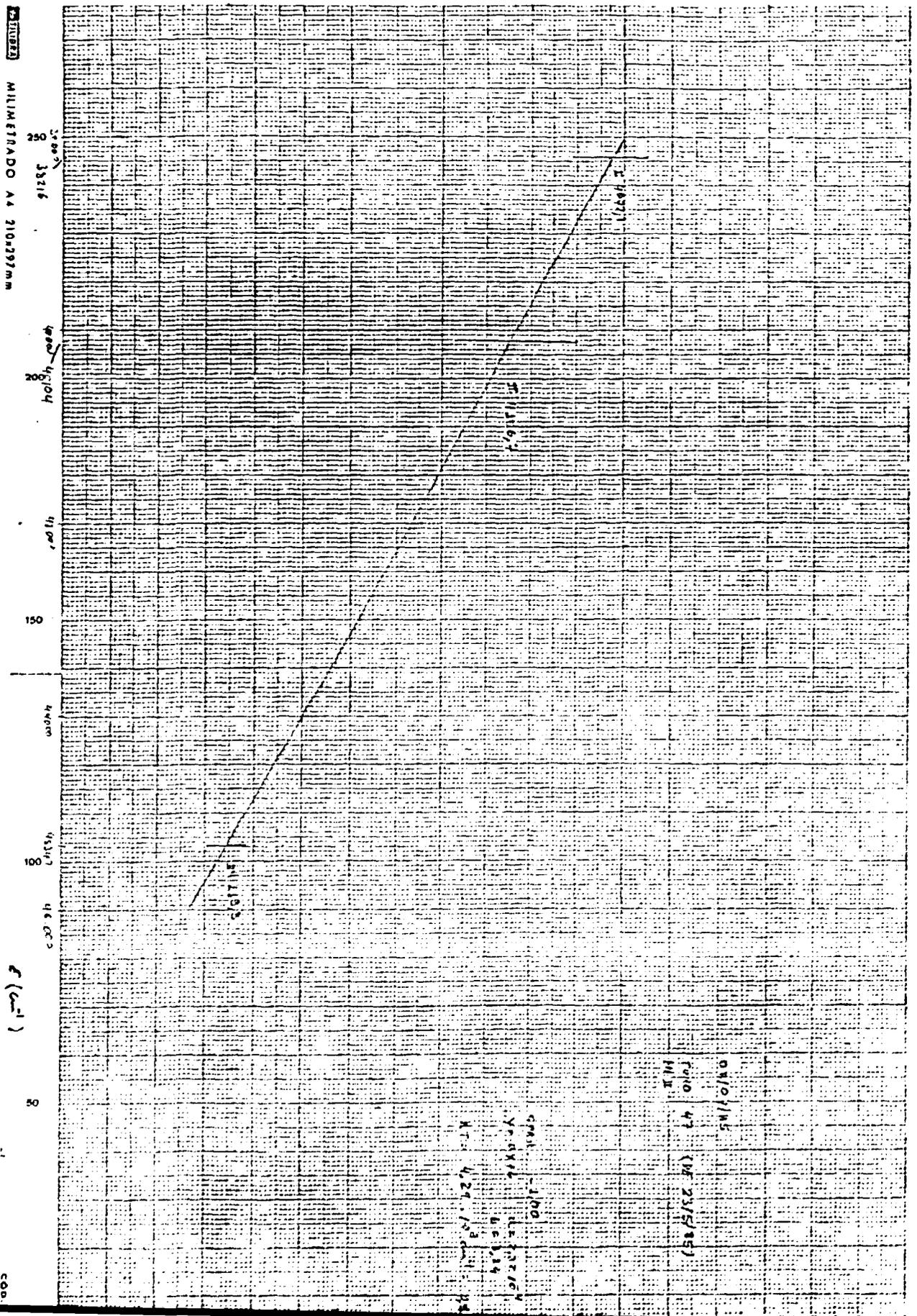
100

200

300

400

500



MILIMETRADO A 4 210237mm

f (cm⁻¹)

λ (cm)

cm

04/07/85
 Foto 47 (MF 23/5/85)
 M.I.

cmal. - 1100
 Ynd. x 100 11.3000
 E. 1.24
 X.T. 4.27 1.5 cm. 1.8

IV - MAÇARICO DE PLASMA

O maçarico de plasma é um dispositivo muito eficiente (40 a 90 %) para transformar energia elétrica diretamente em calor na forma de gases a altas temperaturas (3000 a 20000 graus)^(1,2). A sua alta eficiência o torna muito vantajoso para países pobres em combustíveis fósseis e ricos em eletricidade hídrica. Essencialmente qualquer gás pode ser aquecido sem que haja mistura com produtos de combustão ou contaminação com impurezas do combustível. Isto torna o maçarico de aquecimento atraente para a indústria química, particularmente a siderurgia. Já foi demonstrado que o maçarico de plasma pode ser usado com vantagens na redução direta do minério de ferro e também na produção de aço⁽³⁾. Essencialmente metade do consumo de carvão é trocado por eletricidade. Existem também exemplos de uso industrial de maçaricos de plasma em fornos de aciarias elétricas, substituindo, com vantagens, os fornos de arco elétrico convencionais⁽⁴⁾. O maçarico tem ainda outras aplicações como corte e solda de metais, reações químicas, sinterização de cerâmicas, revestimento de superfícies, tratamento de refratários, etc.⁽⁵⁾.

Existe interesse demonstrado ao longo destas linhas pela CESP, pela SIDERBRÁS, pela COSIPA, pela CSN e pela Eletrometal. Também companhias médias tem demonstrado interesse em maçaricos a níveis de potência mais baixas (Bambozzi S/A, Hatsuta Industrial).

O Laboratório de Plasma da UNICAMP vem estudando maçaricos de plasma desde 1980, com uma linha de pesquisa mais aplicada, ainda que acoplada a sua linha de pesquisa principal sobre plasmas apropriados para fusão termonuclear controlada.

O Laboratório construiu e está operando desde o início

de 1983 um maçarico de plasma para corte de metais, com recursos da FINEP e do CNPq. Este maçarico corta aço inox de 16 mm com velocidade de 50 cm/min e tem uma potência de 8 kW. Uma versão deste maçarico, adaptado a um anodo rotatório, foi utilizado para se fazer uma medida espectroscópica de temperatura, usando as intensidades de duas linhas de argônio. Através da transformação de Abel foi possível calcular o perfil radial da temperatura. Este trabalho faz parte de uma tese de mestrado⁽⁶⁾. Existe ainda um maçarico de aquecimento de gases, que opera com uma mistura de argônio e nitrogênio, com uma potência de 1 a 2 kW.

O Laboratório de Plasma da UNICAMP está desenvolvendo maçaricos de plasma para aquecimento de gases que serão testados acoplados a um forno para cerâmicas e/ou a uma panela de fundição. O projeto consta de três etapas: 20 kW, 100 kW e 500 kW de potência. O sistema consiste do maçarico, a fonte, o painel de controle e o forno e/ou panela. A fonte, o painel e o forno/panela são encomendados da indústria nacional, que os fabrica de acordo com as especificações desejadas.

Há dois projetos em desenvolvimento.

Projeto 1

(Responsável: Prof. Aruy Marotta)

O Maçarico de Plasma que foi desenvolvido até o presente momento apresentou o seguinte resultado (Figura 1): corte de aço inoxidável AISI 304, de 16 mm de espessura, à velocidade de 0,5 m/min com ótima qualidade de acabamento. A potência no jato foi de 8 kW (80A, 100V) e o gás argônio à vazão de 20 l/min e pressão de 2,5 atm. As seguintes etapas de desenvolvimento do projeto foram cumpridas:

- 1) Construção de fonte de alimentação DC monofásica de 250V com ajuste de corrente de 20 a 100 A, potência de entrada de 15kVA, tensão em aberto de 500V. A fonte tem característica V-I apropriada para se obter a máxima performance do maçarico de plasma.
- 2) Construção de vários protótipos do maçarico, onde entre outros foram resolvidos os seguintes problemas: otimização no corte, aumento da vida média dos componentes, facilidade da montagem e centralização do catodo, obtenção de estabilidade hidrodinâmica do fluxo de gás, eliminação de fenômenos indesejáveis como arco duplo e baixa pressão dinâmica.
- 3) Construção de sistema de refrigeração de água e de alimentação de gás com respectivos medidores.
- 4) Construção de chave especial para passar o maçarico do modo de operação não-transferido para transferido e vice-versa.
- 5) Construção de mesa com carro motorizado para teste do maçarico no corte.
- 6) Construção de sistema de exaustão de gases que se formam no corte bem como do ozônio prejudicial à saúde.
- 7) Cálculos de um modelo teórico do jato de plasma não-transferido

baseado nas equações de Elenbaas-Heller que permitem determinar a interrelação entre os vários parâmetros operacionais maçarico e da fonte. Foram obtidas curvas teóricas características de tensão e corrente, potência e temperatura do plasma, temperatura e diâmetro do canal, etc. Com esses resultados foi possível projetar um maçarico ajustado à faixa de potência e corrente disponível na fonte, velocidade de corte, etc.

- 8) Diagnóstico ótico espectroscópico a fim de se determinar os perfis de temperatura e densidade do jato de plasma. Para isso foi construído um anodo rotatório refrigerado a água com capacidade para correntes de 300A, velocidade de 2000 rpm. Entre esse elemento e o maçarico obtem-se um arco estacionário, estável, permitindo simular as condições do corte sem danificar o anodo. Montagem do maçarico em um estágio de movimento linear com precisão de 37 μ m de deslocamento lateral. Montagem de um sistema ótico de alta resolução espacial para focalização da luz do plasma na fenda de um espectrômetro SPEX. Montagem de sistema de alinhamento ótico com laser de He-Ne. Detecção com fotomultiplicadora, eletrômetro Kwithley e registrador.

A intensidade total de duas linhas de emissão do plasma de argônio é obtida para diferentes cordas de uma dada seção reta do plasma. Essas funções são invertidas numericamente num computador usando a transformada de Abel. O resultado é o perfil radial dos coeficientes de emissividade volumétrica para as linhas medidas. Desses resultados, supondo o plasma em equilíbrio termodinâmico local (LTE) e usando a fórmula de Boltzmann obteve-se o perfil de temperatura dos elétrons no plasma pela intensidade relativa de duas linhas de emissão:

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{A_p g_p \lambda_s}{A_s g_s \lambda_p} \exp\left(-\frac{E_p - E_s}{KT}\right)$$

Resultados preliminares dão uma temperatura no centro em torno de 15000 °C.

Com esse sistema espectroscópico pode-se avaliar também a taxa de erosão do catodo de tungstênio, quer pela intensidade do espectro contínuo de emissão ou de uma sua linha.

A densidade eletrônica é obtida a partir da largura Stark da linha de emissão H_{β} do hidrogênio introduzido no fluxo do argônio em pequena proporção, com esse objetivo específico.

- 9) Determinação experimental dos parâmetros macroscópicos básicos de operação do jato e da fonte: características V-I, vazão, pressão, velocidade, pressão dinâmica, etc.
- 10) O maçarico de plasma para corte de inox já vem operando rotineiramente realizando serviço de corte para pessoas interessadas do Departamento de Eletrônica Quântica do Instituto de Física.

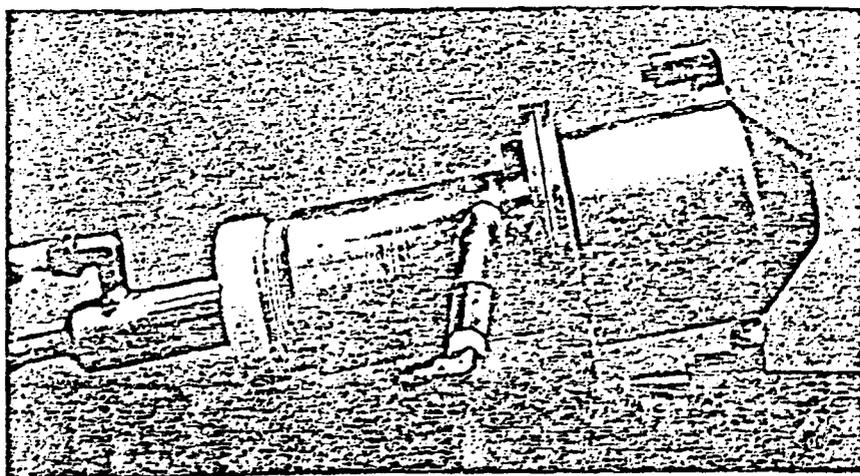


Figura 1 - Maçarico de Plasma de corte de aço construído
no Instituto de Física da Unicamp

Projeto II

(Responsável: Prof. José Busnardo Neto)

O Laboratório colocou em operação inicial, desde Agosto de 1984, um maçarico de plasma para aquecimento de ar, com um sistema de abertura do arco através de um oscilador de RF. A fonte de potência e o oscilador de RF foram construídos sob encomenda pela Bambozzi S/A., de Matão, SP. O maçarico propriamente dito foi construído pelo pessoal técnico do Laboratório e da Oficina Central do IFGW. Este maçarico já mostrou estabilidade de operação entre 5 e 20 kW, com uma temperatura de chama acima de 3400°C, e um fluxo de ar de 50 a 150 l/min. Na UNICAMP, o tempo máximo de operação foi de sete minutos, que é a duração do suprimento do ar comprimido do laboratório. Este maçarico atualmente está sendo testado em campo, na Bambozzi, onde já operou ininterruptamente, em condições estáveis, em testes de uma hora e de duas horas.

A região onde já se obteve operação estável está indicada com hachurado escuro na Fig. 1. Esta região é limitada pela corrente máxima da fonte (60 A) e pela potência máxima da fonte (20 kW). A Fig.2 mostra o maçarico em operação.

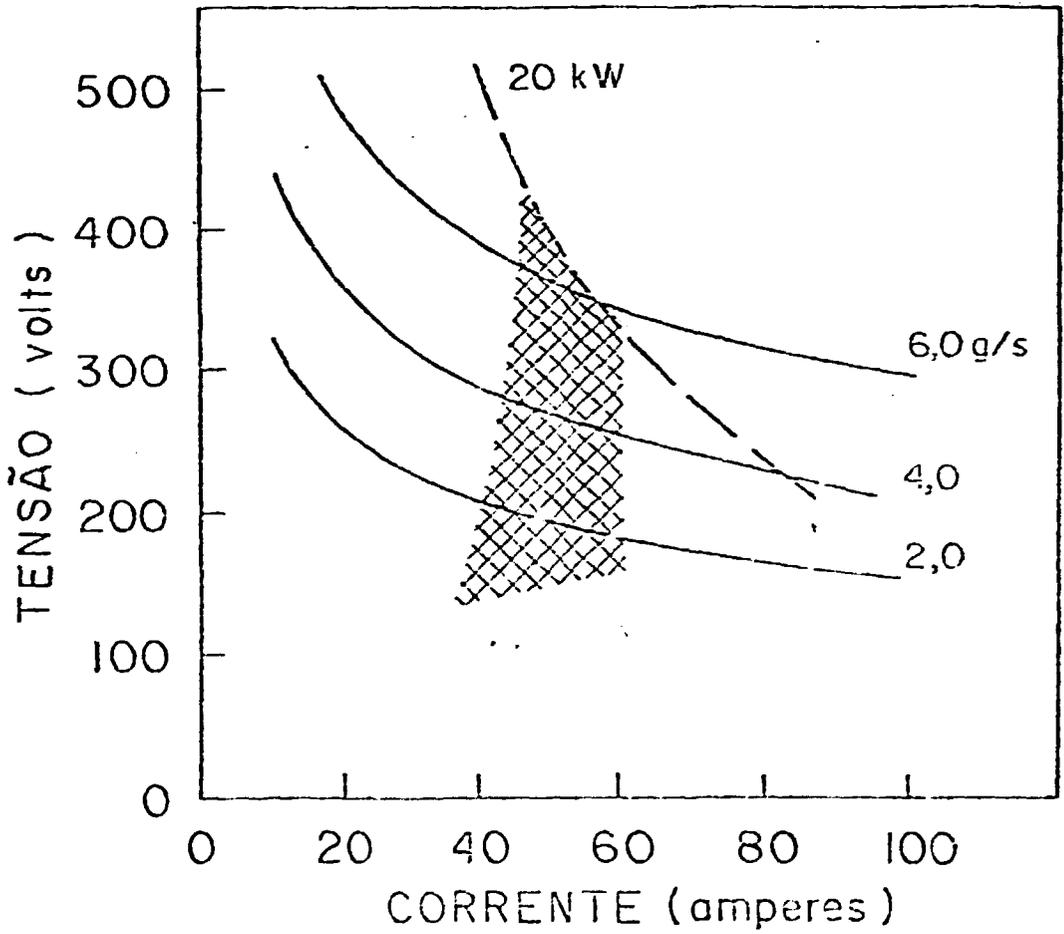


Fig.1 - Região onde já se obtve operação estável do maçarico de plasma. As curvas são curvas de projeto para vários fluxos de ar comprimido.

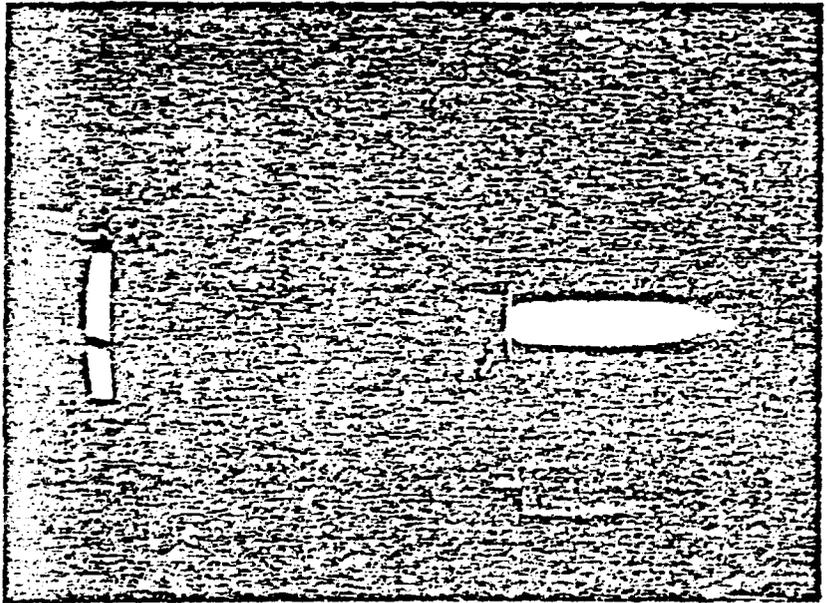


Fig. 2 - Maçarico de Plasma de 20 kW em operação

V - CONFERÊNCIAS

A - SPRING COLLEGE ON PLASMA PHYSICS

International Centre for Theoretical Physics,
Trieste, Itália, 23/05/85 a 20/06/85.

04 (quatro) trabalhos apresentados (lista anexa)

B - VI CONGRESSO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE VÁCUO NA
INDÚSTRIA E NA CIÊNCIA

Rio de Janeiro, RJ, 22/07/85 a 24/07/85.

04 (quatro) trabalhos apresentados lista anexa)

C - 37^a REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O
PROGRESSO DA CIÊNCIA

Belo Horizonte, MG, 10/07/85 a 17/07/85.

15 (quinze) trabalhos apresentados (lista anexa)

VI - TESES DEFENDIDAS

CÂNDIDO DA CUNHA RAPOZO (Doutoramento)

Defendida em 29/05/85

Título: "AQUECIMENTO DO PLASMA POR RÁDIO-FREQUÊNCIA NA MÁQUINA LINEAR LISA".

Orientador: Prof. Paulo H. Sakanaka

LUIS CARLOS VICENTE (Mestrado)

Defendida em 22/03/85

Título: "CONSTRUÇÃO E DIAGNÓSTICO DE UM MAÇARICO DE PLASMA PARA CORTE".

Orientador: Prof. Aruy Marotta

VII - PUBLICAÇÕES DE TRABALHOS EM REVISTAS E ANAIS DE CONGRESSO

Período: 1984 - 1985

1. Título: "Microwave Plasma Mode Conversion".
Autores: H.R. Torres da Silva, and P.H. Sakanaka
Proceedings: Simpósio Internacional de Microondas no Desenvolvimento Industrial - Brasil , 1985, pág.397

2. Título: "RF Plasma Heating in the Linear Lisa Machine"
Autores: C. da C. Rapozo and P.H. Sakanaka
Proceedings of Spring College on Plasma Physics ,Trieste, 1985.

3. Título: "Analysis of the m=2 Rotational Instability in Reversed Field Configurations".
Autores: M.A.M. Santiago, A.S. Gomes and P.H. Sakanaka
Proceedings of Spring College on Plasma Physics ,Trieste, 1985.

4. Título: "Charged Plasma Particle Collision in the Presence of a Strong Laser Field".
Autores: H.R. Torres da Silva and P.H. Sakanaka
Proceedings of Spring College on Plasma Physics ,Trieste, 1985.

5. Título: "Alfvén Wave Heating of High Beta Plasmas".
Autores: K.H. Tsui, C.A. Azevedo and P.H. Sakanaka
Proceedings of Spring College on Plasma Physics ,Trieste, 1985.

6. Título: "Influência do Campo Magnético B_0 na Ressonância Híbrida Inferior".
Autores: C.C. Rapozo, P.H. Sakanaka, Y. Shigueoka e J.C. Xavier
Comunicações da VI Reunião Anual da SBV (Sociedade Brasileira de Vácuo), 1985.

Publicações de Trabalhos em Revistas e Anais de Congresso
(continuação)

7. Título: "Sistema de Vácuo para Máquina Toróide Compacto da UNICAMP".
Autores: L.F. Delboni, C. Rodrigues Neto e M. Machida
Comunicações da VI Reunião Anual da SBV (Sociedade Brasileira de Vácuo), 1985.
8. Título: "Produção e Diagnóstico do Plasma Produzido por Laser em um Sólido de Nióbio".
Autores: D. de O. Campos e H.K. Böckelmann
Comunicações da VI Reunião Anual da SBV (Sociedade Brasileira de Vácuo), 1985.
9. Título: "Dinâmica do Plasma Confinado Magneticamente no Theta-Pinch Tupã".
Autores: M.E. Kayama, R.Y. Honda, H.K. Böckelmann e P.H. Sakanaka
Comunicações da VI Reunião Anual da SBV (Sociedade Brasileira de Vácuo), 1985.

VIII - TRABALHOS APRESENTADOS NA 37^a REUNIÃO ANUAL DA SBPC
10 A 17 DE JULHO DE 1985 - BELO HORIZONTE - MG.

1. Newton L.P. Mansur e Paulo H. Sakanaka
"ROTAÇÃO DE UM PLASMA EM UM θ -PINCH DE CAMPO REVERSO EM EQUILÍBRIO".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 20-D.1.7, pág. 321
2. Vladimir H.B. Scheid e Paulo H. Sakanaka
"ESTUDO DO COMPORTAMENTO TENSORIAL DA CONDUTIVIDADE NUM PLASMA MAGNETIZADO".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 25-D.1.7, pág. 322
3. Conrado S. Simão Zenun e Paulo H. Sakanaka
"DINÂMICA DE IMPLOSAO NUM THETA-PINCH".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 26-D.1.7, pág. 322
4. Magno P. Collares e Munemasa Machida
"CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UMA SONDA DE PRESSÃO PARA DIAGNÓSTICOS DE PLASMAS".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 34-D.1.7, pág. 324
5. Luiz C. Vicente, Aruy Marotta e Paulo H. Sakanaka
"DIAGNÓSTICO DE UM MAÇARICO DE PLASMA PARA CORTE".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 35-D.1.7, pág. 324
6. Luiz C. Vicente e Aruy Marotta
"SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE ELENBAAS-HELLER PARA UM JATO DE PLASMA".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 36-D.1.7, pág. 324
7. Aruy Marotta
"ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE MAÇARICOS DE PLASMA PARA A INDÚSTRIA".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 37-D.1.7, pág. 324
8. Milton E. Kayama, Paulo H. Sakanaka e Helmut K. Bückelmann
"COMPUTATION ANALYSIS OF MAGNETIC PROBE SIGNALS IN REVERSED FIELDS EXPERIMENTS IN TUPÄ-THETA-PINCH".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 38-D.1.7, pág. 325

9. Milton E. Kayama, Roberto Y. Honda, Magno P. Collares, Helmut K. Böckelmann, Munemasa Machida e Paulo H. Sakanaka
"OBSERVATION OF MAGNETIC FIELD LINE RECONNECTION AT THE ENDS OF TUPĀ-THETA-PINCH"
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 39-D.1.7, pág. 325
10. Delton de O. Campos e Helmut K. Böckelmann
"PLASMA PRODUZIDO POR LASER EM SÓLIDO".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 40-D.1.7, pág. 325
11. Vicene A. Rodrigues e José Busnardo Neto
"MAÇARICO DE PLASMAS PARA A SIDEURGIA"
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 41-D.1.7, pág. 325
12. Hisataki Shigueoka, Iberê L. Caldas e Paulo H. Sakanaka
"EFEITO DO ACOPLAMENTO ENTRE OS MODOS POLOIDAIIS M NA ESTABILIDADE DE TOKAMAK".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 42-D-1.7, pág. 326
13. Yoshuyuki Shigueoka e Paulo H. Sakanaka
"ANÁLISE DE "RAY-TRACING" POR AQUECIMENTO PELA RESSONÂNCIA CICLOTRÔNICA DO ION NO PLASMA DE TOKAMAK".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 43-D-1.7, pág. 326
14. Hector R. Torres Silva, Cândido da C. Rapozo e Paulo H. Sakanaka
"ACOPLAMENTO DE MODOS DOMINANTES NA MÁQUINA LINEAR LISA".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 44-D.1.7, pág. 326
15. Cândido da Cunha Rapozo e Paulo H. Sakanaka
"ONDAS ION-ACÚSTICA, MODO LENTO, NUM PLASMA MAGNETIZADO".
Revista: Ciência e Cultura (Suplemento), 45-D.1.7, pág. 326