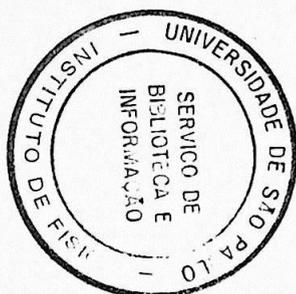


UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA



SBI-IFUSP



INJEÇÃO PULSADA DE GÁS NO TOKAMAK TBR-I



Douglas Cavalli Giraldez

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Física da Universidade de
São Paulo

Orientador: Prof. Dr. José Henrique Vuolo

Defesa em 23/05/88

SÃO PAULO
1988

530.44

G. 516i

M

e. 2



FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Giraldez, Douglas Cavalli
Injeção pulsada de Gás no Tokamak TBR-I. São
Paulo, 1988.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Pau-
lo. Instituto de Física. Departamento de Física Expe-
rimental.

Área de Concentração: Física Nuclear
Orientador: Prof. Dr. José Henrique Vuolo

Unitermos: 1. Densidade de plasma; 2. Temperatura
de elétrons; 3. Emissão de raios-x duros; 4. Sistemas
de vácuo.

USP/IF/SBI - 11/88

"The course of true love never did run smooth
(W. Shakespeare, A Midsummer-Night's Dream, 19 Ato, Cena

aos MEUS PAIS,
ã DENIZE, minha IRMÃ,
ã ISABEL, minha MULHER e COMPANHEIRA,
e ã SARAH, minha AMIGA
pessoas sem as quais eu nunca teria
chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao Peninha (Prof. Dr. José Henrique Vuolo), pela orientação na fase final deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Ivan Cunha Nascimento, pela orientação na fase inicial deste trabalho;

Ao Banzai (Edson Kenzo Sanada) e ao Oskar (Oskar W. Bender), pela ajuda prestada na obtenção dos dados;

Ao Prof. Aluísio N. Fagundes, pelo auxílio na parte computacional e pelas diversas sugestões a este trabalho;

Ao Wanderlêvio (Wanderley Pires de Sã), pela ajuda na parte computacional, também, e pela redescoberta de uma amizade que eu julgava perdida e que foi preciosa na época em que ele ganhou o apelido acima;

Ao Dirceu (Dirceu F. da Cruz Jr.), que através da nossa florescente amizade, me ajudou a compreender que é necessário arriscar;

Ao Emilson (Emilson H. Moisés) e ao Ivan (Ivan Cardoso dos Santos), que sempre estiveram prontos para resolver aqueles problemas técnicos, que tanto entravam o trabalho experimental;

Aos demais membros do Grupo de Física de Plasma (professores, bolsistas, técnicos e pessoal da secretaria), que contribuíram de diversas maneiras para a consecução deste trabalho;

Ao CNPq e à FINEP, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Este trabalho relata a implantação da técnica de injeção pulsada de gás no tokamak TBR-I, desde a instalação do equipamento necessário à injeção de gás, até o estudo comparativo do estado do plasma com e sem a introdução adicional de gás.

Uma válvula eletromecânica de ação rápida foi construída para injeção de gás, sendo apresentados resultados preliminares. Entretanto, para injeção no tokamak TBR-I foi utilizada uma válvula piezoelétrica comercial (PV-10/Veeco).

Foram realizadas medidas para determinação do fluxo de gás do sistema de injeção pulsada e determinadas as melhores condições para injeção de gás no tokamak TBR-I.

A temperatura e a densidade na borda no plasma foram medidas com uma sonda eletrostática simples, para correntes de 6 e 8kA, visando o estudo comparativo de descargas com e sem injeção pulsada de gás. Nessas medidas são monitoradas a atividade MHD, a emissão de raios-X duros, a tensão de enlace, além da corrente e posição do plasma.

ABSTRACT

We describe here the implanting of gas puffing techniques in TBR-I Tokamak, since the installation of necessary equipment and electronics, built around a piezoelectric commercial valve (Veeco PV-10), to comparative studies of effects on the plasma state.

Measurements of the throughput of the gas puffing system were made and used to determine the best operating conditions for the injection of gas. We made the comparative studies of plasma behaviour with and without the injection of gas, for plasma currents of 6 and 8kA, using an electrostatic probe for density and temperature measurements on the edge of plasma column. We also monitored the MHD activity related to the gas puffing process, as well as hard X-ray emission, loop voltage and plasma position.

It is also described the attempts and preliminary results of the construction at our laboratory of a fast acting valve for the process.

ÍNDICE

	Pág.
I - INTRODUÇÃO	1
II - INJEÇÃO PULSADA DE GÁS EM TOKAMAKS	4
II.1. Introdução	4
II.2. Limite de Densidade do Plasma	6
II.3. Resfriamento da Periferia do Plasma	14
II.4. Produção de Elétrons Runaways	15
II.5. Outras Aplicações da Injeção Pulsada ...	17
II.5.1. Transporte de Impurezas	17
II.5.2. Controle do Fluxo de Partículas Neutras	18
II.5.3. Diagnóstico por Meio de Injeção Pulsada	19
III. DESCRIÇÃO DO TBR-I, DOS DIAGNÓSTICOS USADOS E DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	21
III.1. Descrição do TBR-I	21
III.2. Descrição dos Instrumentos de Diagnósti- co	25
a. Sonda Eletrostática Simples	25
b. Detetor de R-X de Alta Energia	25
c. Bobinas de Mirnov	25
d. Bobinas de Rogowsky	26

e. Bobinas de Posição Horizontal e Vertical	27
f. Espiras de Enlace	30
g. Monocromador	30
h. Analisador de Gás Residual	30
III.3. Descrição do Sistema de Aquisição de Dados	32
IV. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE GÁS	34
IV.1. Implantação do Sistema de Injeção Pulsada de Gás	34
IV.2. Medida dos Parâmetros Característicos da Injeção Pulsada de Gás	41
V. DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO TBR-I COM O SIPUG	49
VI. RESULTADOS COM E SEM INJEÇÃO PULSADA DE GÁS	59
VII. CONCLUSÃO	77
APÊNDICE A - CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ESCOAMENTO DE GASES E TECNOLOGIA DE VÁCUO USADOS NESTE TRABALHO	81
APÊNDICE B - VÁLVULA RÁPIDA ELETROMECÂNICA	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

I. INTRODUÇÃO

A injeção pulsada de gás é uma técnica experimental muito difundida em tokamaks, que visa aumentar ou manter a densidade de plasma, enquanto a temperatura de plasma costuma se manter estável ou cair com a injeção de gás. Este trabalho relata a implantação desta técnica no TBR-I; compreendendo a instalação do equipamento necessário à injeção de gás, e um estudo comparativo do estado do plasma com e sem a introdução adicional de gás.

Uma válvula eletromecânica de ação rápida para a admissão de gás em alto vácuo, foi construída no Laboratório. Entretanto, para injeção no tokamak TBR-I foi utilizada uma válvula piezoelétrica comercial (PV-10/Veeco).

Medidas para determinação do fluxo de gás do sistema de injeção pulsada e do tempo de incorporação do gás a câmara de vácuo foram realizadas; e a partir delas, determinadas as melhores condições para injeção de gás nas descargas tokamak do TBR-I.

Visando o estudo comparativo de descargas com e sem injeção pulsada de gás, a temperatura e densidade na borda do plasma foram medidas com uma sonda eletrostática simples, para correntes de 6 e 8 kA. Nessas medidas ainda foram monitoradas a atividade MHD, através de um conjunto de 16 bobinas magnéticas; a emissão de raios-X duros, por um cintilador de NaI; a tensão de enlace, através de uma espira e a corrente e a po

sição do plasma, por meio de bobinas de Rogowsky.

Contudo, resultados mais completos poderiam ter sido obtidos se as montagens do interferômetro de microondas, para a medida da densidade, e do espectroscópio ótico, para a medida da temperatura, não estivessem atrasadas. Do mesmo modo, as condições do plasma seriam melhores se o sistema de realimentação do campo vertical já estivesse operacional.

Como consequência desses atrasos, os resultados e conclusões deste trabalho devem ser encarados como preliminares, como indicações para um outro trabalho a ser realizado quando os diagnósticos e o sistema citados acima estiverem em operação. Apesar disto, este trabalho é o primeiro a utilizar de modo integrado alguns dos instrumentos de medida construídos no Laboratório.

O texto está organizado em sete capítulos e dois apêndices.

No capítulo 2 discutimos o limite de densidade de plasma em tokamaks e aplicações da injeção pulsada de gás.

No capítulo 3 descrevemos o tokamak TBR-I, os diagnósticos utilizados e o sistema de aquisição de dados.

No capítulo 4 descrevemos o sistema de injeção de gás original do TBR-I e a instalação do equipamento que permite a injeção pulsada. Relatando também a medida das características do sistema implantado - o fluxo de gás da válvula rápida e o tempo de incorporação do gás à câmara de vácuo.

No capítulo 5 mostramos como foram obtidas as melhores condições de operação do TBR-I com a injeção pulsada de gás, através do ajuste de cinco parâmetros que definem um disparo da válvula rápida.

No capítulo 6 apresentamos os resultados comparati-

vos para as descargas tokamak no TBR-I, com e sem a injeção pulsada.

No capítulo 7 apresentamos as conclusões do trabalho.

No apêndice A apresentamos alguns conceitos básicos sobre escoamento de gás e sistemas de vácuo. No apêndice B apresentamos o projeto e resultados preliminares da válvula eletromecânica de ação rápida construída no Laboratório.

II. INJEÇÃO PULSADA DE GAS EM TOKAMAKS

II.1. Introdução

O principal objetivo da injeção pulsada de gás é aumentar a densidade máxima de plasma num tokamak. Isto é importante por que o interesse maior de tokamaks é justamente a reação de fusão termonuclear controlada, para o que uma das condições é aumentar o produto $n\tau$ (densidade x tempo de confinamento da energia). Além disso, tem sido observado em vários tokamaks [ROB-83] que o tempo de confinamento da energia de eletrons, aumenta linearmente com a densidade. Resulta daí um duplo interesse em operar tokamaks em densidades altas.

Na Figura II.1 [FUR-75] temos um esquema do fluxo de energia típico num tokamak ohmicamente aquecido, mostrando os vários mecanismos diretamente envolvidos. A injeção pulsada de gás afeta diretamente todos estes processos, sendo portanto, uma questão bastante complicada de ser tratada teoricamente. Na verdade não existe uma abordagem geral completa e obviamente não se pretende fazê-la aqui. Mas esta influência abrangente sobre os processos elementares de plasma, levou a injeção pulsada de gás a ser utilizada também, com outros objetivos imediatos além do mencionado acima (aumento de densidade).

Uma dessas aplicações é o resfriamento da periferia do plasma por radiação de íons de impurezas injetadas, evitando "sputtering" ou outros danos à parede [FUR-75].

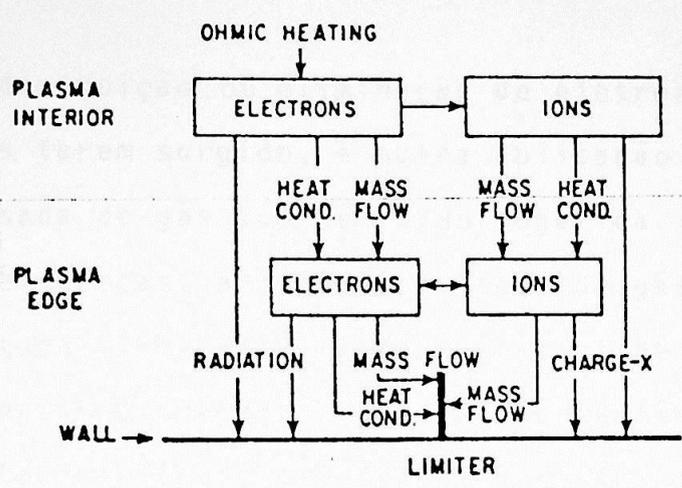


FIG. II.1 - ESQUEMA DO FLUXO DE ENERGIA EM UM TOKAMAK AQUECIDO OHMICAMENTE [FUR-75].

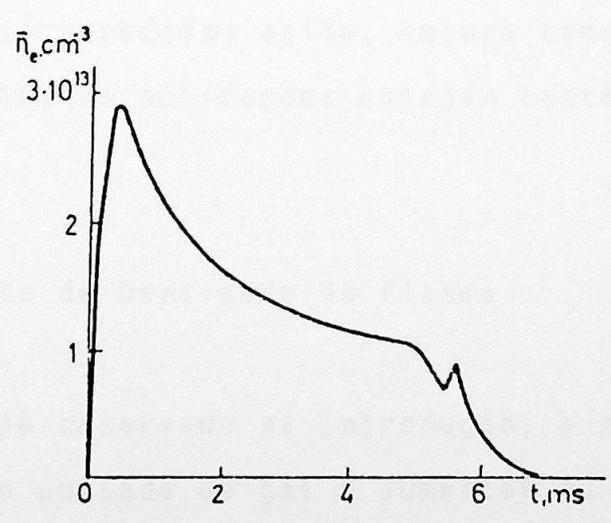


FIG. II.2 - DENSIDADE ELETRÔNICA VERSUS TEMPO NO TOKAMAK TM-3 [ART-72].

A diminuição ou eliminação de elétrons fugitivos, mesmo após eles terem surgido, é outra aplicação da técnica de injeção pulsada de gás que tem sido sugerida [KNO-79].

Além destas, a injeção pulsada de gás tem sido proposta e testada [BUR-76/78] como tentativa de reverter o fluxo de impurezas no tokamak, que usualmente tendem a se concentrar no centro do plasma aumentando o resfriamento radiativo.

Podem ser ainda mencionadas outras aplicações da injeção pulsada, tais como o controle do fluxo de partículas neutras quando se deposita metal fresco nas paredes do tokamak [STO-75] ou sua utilização em métodos de diagnóstico de plasma [GOR-71].

Uma vez que o principal interesse da injeção pulsada de gás é aumentar ou manter a densidade do plasma, o limite de densidade de plasma será discutido a seguir. Também serão discutidos, separadamente, alguns aspectos ou aplicações da injeção pulsada já resumidos acima, embora como já foi observado, tais aspectos ou aplicações estejam bastante relacionados entre si.

II.2. Limite de Densidade do Plasma

Como já observado na Introdução, a principal finalidade da injeção pulsada de gás é aumentar ou manter a densidade de plasma. Na maioria das descargas em tokamaks com alimentação estática de gás, a densidade alcança um valor de pico, correspondente à pressão de preenchimento, diminuindo continuamente após (como na Fig. II.2 [ART-72]). Mesmo que a pressão de preenchimento seja aumentada, a densidade de plasma não aumenta na mesma proporção exceto no pico inicial. Desse

modo, o decaimento contínuo da densidade é evitado pela injeção pulsada de gás no decorrer da descarga, podendo a densidade então, variar numa larga faixa.

Murakami mostrou [MUR-76] que a densidade média de elétrons \bar{n}_e é proporcional ao produto $j(0) \cdot q(0)$ e que para um dado valor deste produto é possível aumentar \bar{n}_e através da injeção pulsada de gás (Fig. II.3). Contudo, observa-se que a densidade eletrônica está limitada pelo aparecimento da instabilidade disruptiva, a qual está associada à contração do canal de corrente. Altas densidades parecem aumentar as possibilidades de contração, por causa do resfriamento induzido na periferia do plasma pelos altos níveis de gás neutro e fluxo de impurezas que essas descargas apresentam. No mesmo trabalho, entretanto, Murakami sugere que o problema pode ser contornado por uma injeção suplementar de energia no plasma, o que foi tentado com sucesso por K. Toi e outros [TOI-78].

Porém, os fenômenos físicos que limitam a densidade, conduzindo à instabilidade disruptiva, não estão bem compreendidos. Apesar disso há dois modelos para o limite de densidade de que têm maior aceitação.

É observado com frequência que quando tokamaks operam a densidades muito altas, uma fração significativa da potência de entrada é perdida por radiação. Foi considerado por A. Gibson [GIB-76] se estas perdas poderiam determinar o limite de densidade. Em particular ele examinou a hipótese de que a máxima densidade na qual um tokamak pode operar, é aquela onde uma fração fixa (F) da potência de entrada é irradiada.

A. Gibson mostra que a potência irradiada por centímetro cúbico num plasma com três espécies atômicas, cuja espécie base é o hidrogênio, pode ser escrita como:

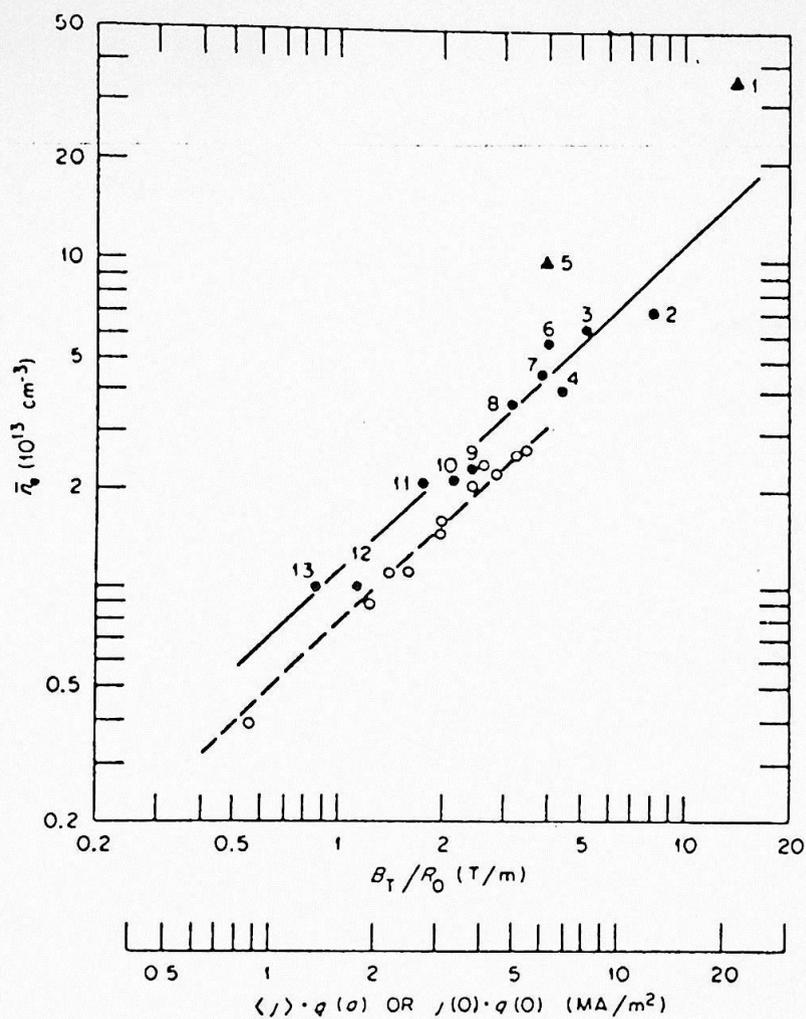


FIG. II.3 - MÁXIMA DENSIDADE DE PLASMA (CÍRCULOS PRETOS) EM VÁRIOS TOKAMAKS VERSUS $B_T/R_0 \propto j(0)q(0)$, O QUAL É UMA MEDIDA DA DENSIDADE DE CORRENTE NO CENTRO DO PLASMA, SUPONDO $q(0)=1$, OU UMA MEDIDA DA DENSIDADE DE CORRENTE MÉDIA PARA UM DADO $q(a)$. OS TRIÂNGULOS PRETOS INDICAM DENSIDADES QUE FORAM OBTIDAS POR INJEÇÃO PULSADA DE GÁS, DEPOIS DO EQUILÍBRIO TER SIDO ALCANÇADO. OS CÍRCULOS BRANCOS SÃO AS DENSIDADES OBTIDAS NUMA EXPERIÊNCIA NO "ORMAK" ONDE A PRESSÃO DE PREENCHIMENTO E $q(a)$ FORAM MANTIDOS CONSTANTES [MUR-76].

$$p_L = \alpha_r \xi Z_e n_e^2 T_e^m \quad (\text{II.1})$$

onde

$$\xi = (Z_e - 1)/Z_e$$

e Z_e , n_e e T_e são, respectivamente, o número atômico efetivo, a densidade e a temperatura de elétrons; com a constante α_r variando de $\sim 7 \times 10^{-28}$ a $\sim 1 \times 10^{-28}$ quando a razão entre as densidades das impurezas de alto Z e baixo Z varia de 0 a $0,3.m = \frac{1}{2}$.

A densidade limite \bar{n} é estabelecida igualando-se a equação II.1 a uma fração F da potência de entrada P_{in} , isto resulta em:

$$\bar{n}_{ec} = \left[\frac{0,1 F \bar{T}_{OH}^{-1,5}}{\alpha_r \xi T_e^m} \right]^{1/2} \frac{I}{\pi a^2} \quad (\text{II.2})$$

onde I e a são a corrente de plasma e o raio menor do plasma; e \bar{T}_{OH} é definido como:

$$0,1 \bar{T}_{OH}^{-1,5} Z_e \left(\frac{I}{\pi a^2} \right)^2 = 2 \int_0^1 n(T) j^2(x) x dx \quad (\text{II.3})$$

Para obter \bar{T}_{OH} de perfis medidos é suposto que $j \propto T^{1,5}$ e que o perfil de temperatura seja gaussiano.

Na Tabela II.1 [GIB-76] podemos comparar as predições da equação II.2 com valores experimentais para um bom número de tokamaks. Os valores nas colunas 8, 9 e 10 da tabela mostram que há um bom acordo do modelo com a experiência.

Ainda na Tabela II.1 há dois casos em que as medidas de radiação foram publicadas. Para os resultados do TFR na li

TABLE I. COMPARISON OF EQ.(8) WITH EXPERIMENT (columns (8) and (9))

Experiment	I (kA)	a (cm)	q_a	$x_{1/2}$	T(o) (eV)	T_{OH} (eV)	Measured Z_e	$\times 10^{-13} \text{ cm}^{-3}$		$\frac{a_R}{F} \times 10^{20}$ if $\bar{n}_{ec} = n_e$ (10)	REF.
								Observed \bar{n}_e	if $\frac{n_R}{F} = 1.5 \times 10^{-20}$ (9)		
<u>ALCATOR</u> (1) R = 54 cm	100	9.5	6.25	0.4	800	229	1-2 1.2†	40	38	1.3	[7]
(2)	82	9.5	4.6	0.4†	570	163	1-2 2†	15	23	3.6 (1)	[8]
<u>PULSATOR</u> (3) R = 70 cm	58	11	4	0.56	473	207	1.9	10	10	1.6	[9]
<u>TFR</u> (4) R = 98 cm	96	20	10	0.29	1530	286	3.6	2	3.3	4.2 (2.2)	[10]
(5)	140	20	3.8	0.5	1150	440	6	3.6	3.3	1.3	[11]
(6)	145	20	7	0.35	2100	504	4.2	2.3	3.2	2.9	[10]
(7)	200	20	4.8	0.35	2050	492	2.7	3.5	5	3.0	[10]
(8)	300	20	3.3	0.5	2210	845	3.6	4.7	4.6	1.4	[10]
<u>ORMAK</u> (9) R = 80 cm	120	23	5	0.5	900	344	8	2.7	2.5	1.3	[12]
<u>S-T</u> (10) R = 109 cm	66	14	4.4	0.41	2300	681	4.6	2	2.3	2	[13]
<u>ATC</u> (11) R = 90 cm	60	17	4	0.42	1150	351	2-5 3.5†	2	2.5	2.3	[14]
(12)	78	16	3.2	0.38	1100	294	5.4	1.9	3.9	6.3 (3.2)	[15]
(13)	78	14	3.2	0.54	700	294	1.3	2.1	9.6	31	[15]

TAB. II.1 - COMPARAÇÃO DA EQ.II.2 COM A EXPERIÊNCIA (COLUNAS 8 e 9)
[GIB-76].

na 5, mais de 40% da potência de entrada é irradiada, enquanto que para os resultados do ST na linha 10, a radiação é cerca de 20% da potência. No T-3 [VER-72] foi estabelecido que quando a densidade limite é alcançada o nível de radiação atinge um máximo, ficando em torno de 30% da potência de entrada, independentemente do valor de n_e e do teor de impurezas. Estes resultados implicam que F , a fração irradiada da potência de entrada na densidade limite, é menor que 1, provavelmente da ordem de $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{3}$.

O outro modelo para o limite de densidade procura vincular a estabilidade dos modos balão aos efeitos da injeção pulsada de gás [LEH-75] [LEH-83]. Para tokamaks com seção transversal circular o critério de estabilidade para os modos balão ideais pode ser escrito como:

$$1 < (\mu_0 j^2 R r_p / 8p) f \quad (\text{II.4})$$

onde j é a densidade de corrente média, R o raio maior do plasma, $r_p = p / |\nabla p|$ o comprimento de escala do gradiente de pressão, p a pressão e f uma função adimensional dos parâmetros relevantes, da ordem de 1. O efeito da injeção pulsada de gás sobre a estabilidade dos modos balão é indireto. Com o aumento da densidade, o gradiente de pressão nas camadas limítrofes do plasma aumenta até um ponto onde o plasma torna-se instável. B. Lehnert [LEH-83] calculou o gradiente de pressão, levando em conta somente o balanço entre gás neutro e plasma. E dentro deste, apenas a componente rápida do gás neutro. Ele ainda usou as equações de fluido. Os resultados relevantes obtidos por Lehnert são o perfil da densidade de partículas neu

tras, o comprimento de penetração das partículas e o gradiente de pressão dentro deste comprimento de penetração, expressos respectivamente por:

$$n_n(x) = n_{na} \text{EXP}[-|x/L_n|^{1+\alpha}] \quad (\text{II.5})$$

$$L_n = [(1+\alpha)(kT_b/C_o^2 m_i \xi \xi_n)^{1/2}]^{1/(1+\alpha)} \quad (\text{II.6})$$

$$p'_b \cong (2C_b^3 |3\theta_n)(m_i \xi \xi_n kT_b)^{1/2} \bar{n}^2 \text{EXP}(-1) \quad (\text{II.7})$$

com $\xi_n = \xi + \xi_{in}$

onde n_{na} é a densidade de partículas neutras no limitador, $x = r - a$, α é um coeficiente que determina a ordem do polinômio que expressa o perfil de densidade de plasma, T_b é a temperatura média na região de interação plasma-gás neutro, $C_o = \frac{2n_o}{a}$ onde n_o é a densidade no centro do plasma, m_i é a massa dos íons, ξ é a taxa de ionização e ξ_{in} é a taxa de transferência de momento entre íons e neutros, $C_b = \frac{n_b}{a}$ onde n_b é a densidade na borda interna da região de interação entre plasma e gás neutro, $\theta_n = n(r = a - L_n)/\bar{n}$ onde \bar{n} é a densidade média.

A densidade limite é obtida substituindo a expressão II.7 na expressão II.4. Resulta que:

$$\bar{n} < n_c = C_n j R^{1/2} \quad (\text{II.8})$$

com

$$C_n = [3\mu_o \theta_n f \text{EXP}(1) | 16C_b^3]^{1/2} / (m_i \xi \xi_n kT_b)^{1/4} \quad (\text{II.9})$$

Na Figura II.4 [LEH-83]

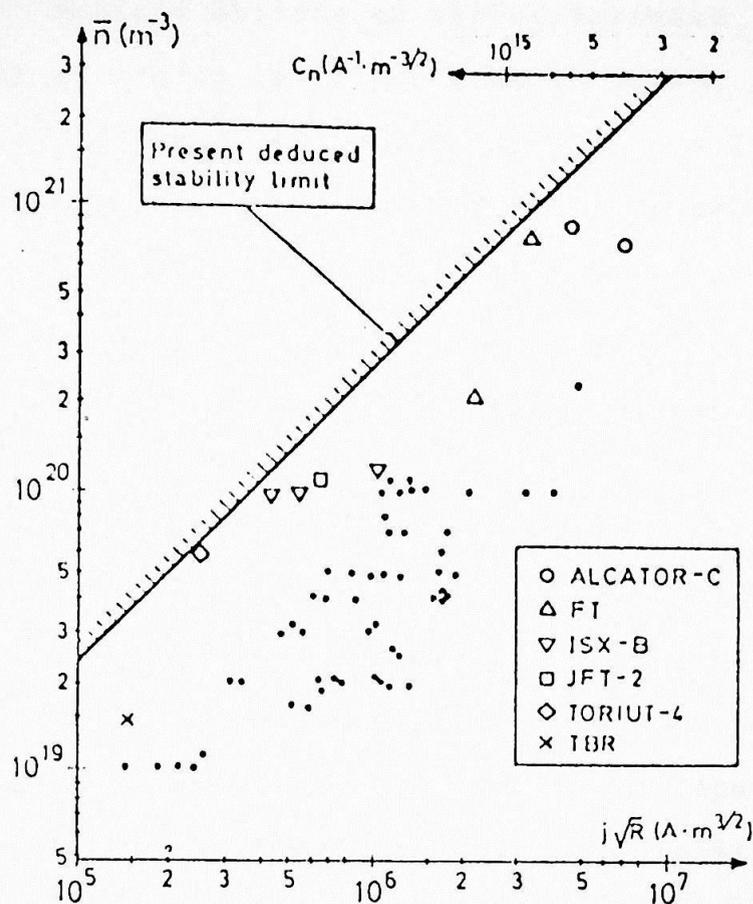


FIG. II.4 - DENSIDADE DE PLASMA MÉDIA \bar{n} VERSUS $j\cdot R_0^{1/2}$, ONDE j É A DENSIDADE DE CORRENTE MÉDIA E R_0 O RAI0 MAIOR DOS TOKAMAKS. OS PONTOS REPRESENTAM OS MAIS ALTOS VALORES DE \bar{n} PARA DADOS VALORES DE $jR_0^{1/2}$. A LINHA INDICA O LIMITE DE ESTABILIDADE ESTABELECIDO PELA CONDIÇÃO II.8 PARA $\theta_n = 0,9$, $C_b = 1$, $f = 1$, $T_b = 10^6 \text{K}$ E $A = 1$. A ORDEM DE GRANDEZA DO ERRO NA POSIÇÃO DA LINHA, PODE SER ESTIMADA DA ESCALA DE C_n NO CANTO SUPERIOR DIREITO DA FIGURA [LEH-83].

temos um gráfico comparando o limite estabelecido acima com dados experimentais obtidos em vários tokamaks. A linha cheia corresponde ao limite calculado onde se adotou $C_n \cong 2,8 \cdot 10^{14} \text{ A}^{-1} \cdot \text{m}^{-3/2}$ ($\theta_n = 0,9$, $C_b = 1$, $f = 1$ e $T_b = 10^6 \text{ K}$). Vê-se que dentro dos erros experimentais há um bom acordo entre dados e teoria.

II.3. Resfriamento da Periferia do Plasma

O resfriamento da periferia do plasma por injeção de gás pode se dar por injeção de impurezas ou hidrogênio.

O resfriamento por impurezas já ocorre espontaneamente pela emissão de radiação de íons, distribuindo o fluxo de calor da descarga uniformemente, com pouco "sputtering" ou outros danos à parede. Entretanto quando se injeta impureza, a quantidade não pode ser maior que a suficiente para irradiar para fora o fluxo de energia total da borda do plasma. Quando isto ocorre a descarga começa a se encolher, terminando pela instabilidade disruptiva [FUR-75]. Presume-se que este encolhimento da coluna pode ser evitado por controle em "feedback" da taxa de aquecimento do plasma ou da taxa de injeção de gás.

Tem sido proposto [FUR-75] que se impurezas injetadas não se difundem apreciavelmente da borda para o centro do plasma, a injeção de impurezas seria um método para o resfriamento da borda, mesmo num plasma de reator.

A injeção pulsada de hidrogênio puro teria a vantagem de reduzir impurezas. O mecanismo básico de penetração do hidrogênio na coluna de plasma é a troca de carga na superfície do plasma, seguida de uma maior penetração dos neutros

energéticos. A utilidade do hidrogênio na transferência de calor para as paredes depende da manutenção de um fluxo de partículas neutras com energia bem abaixo de 50 eV. Contudo, se o resfriamento da borda do plasma se der apenas por troca de carga, a redução da temperatura de partículas a valores tão baixos parece problemática. Mesmo assim, a injeção de hidrogênio poderia ser usada para criar uma região de plasma denso e frio que agiria, temporariamente, como uma barreira contra a penetração de neutros por troca de carga para dentro e para fora da região quente do plasma [FUR-75].

II.4. Produção de Elétrons Runaways

Se um campo elétrico é aplicado ao plasma, os íons sendo mais massivos permanecem quase estacionários enquanto os elétrons são acelerados, mas mesmo assim estes últimos perdem energia por colisão com íons, ou partículas neutras. Numa situação de equilíbrio a força elétrica deve ser contrabalançada pela força de arrasto. Desse modo:

$$eE = \nu m_e v \quad (\text{II.10})$$

onde ν é uma frequência de colisão para troca de momento, tal que:

$$\nu = n \sigma_c v \quad (\text{II.11})$$

com σ_c a seção de choque para transferência de momento, n a densidade do plasma e v a velocidade do elétron.

Usando a fórmula de Rutherford para

$\sigma_c (\sigma_c \propto e^4 / (4\pi\epsilon_0 mv^2)^2)$ podemos reescrever a equação II.10 como segue:

$$eE = \frac{ne^4}{mv^2} \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \quad (\text{II.12})$$

Para elétrons com velocidade v há um equilíbrio entre a força elétrica e a força de arrasto. Contudo, para elétrons com uma velocidade superior a v há um ganho de energia uma vez que a força de arrasto é menor que a força elétrica. Estes elétrons que ganham continuamente energia, chamados elétrons runaways, podem escapar ao confinamento dos campos magnéticos e colidir com as paredes do vaso de vácuo emitindo raios-X por bremsstrahlung.

A condição limite para o aparecimento de elétrons runaways pode ser estabelecida tomando a velocidade térmica dos elétrons como referência e assumindo que a sua distribuição de velocidade é Maxwelliana, assim:

$$E_D \cong \frac{n_p e^3}{kT_e} \cdot \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \quad (\text{II.13})$$

E_D é conhecido como o campo de Dreicer.

Obviamente, a dedução da equação II.13 foi qualitativa [HAS-81], pois um resultado rigoroso exige um tratamento cinético, como por exemplo nas referências [DRE-59] [DRE-60] [GUR-78].

Está claro da equação II.13 que a injeção pulsada de gás altera o aparecimento de elétrons runaways, já que ela provoca alterações nos valores de n_p e T_e . Porém, é difícil

generalizar essa alteração pois as contribuições da densidade e temperatura vão em sentidos opostos. Além disso R.C. Cross e outros [CRO-83] mostraram que o surgimento de runaways é muito sensível aos níveis de oxigênio presentes nas paredes da câmara de vácuo. Se as paredes estão limpas, um aumento da pressão de preenchimento do vaso acompanha uma redução na taxa de produção de runaways. Se as paredes estão sujas o aumento da pressão provoca o efeito contrário. Estes fenômenos parecem estar associados com a produção de vapor d'água durante descargas tokamak. Por isso nem sempre aumentar a pressão e conseqüentemente a densidade é o caminho para se evitar elétrons runaway.

Por causa do trabalho de R.C. Cross, procuramos reproduzir as mesmas condições de condicionamento do TBR-I em cada série de dados.

II.5. Outras Aplicações da Injeção Pulsada

II.5.1. Transporte de impurezas

Um efeito bem conhecido da difusão clássica atua no sentido de concentrar impurezas na região de densidade máxima de hidrogênio. Este efeito é encontrado também nos regimes neoclássicos banana e plateau e no regime Pfirsch-Schlüter.

K.H. Burrel [BUR-76] e T. Ohkawa [OHK-74] tem mostrado que a difusão de impurezas pode ser invertida com uma fonte de prótons de um lado do plasma e um absorvedor do outro lado. A fonte de prótons consiste na injeção local de hidrogênio e o absorvedor é construído por meios mecânicos.

A idéia básica é que os fluxos de prótons e impurezas estão diretamente acoplados. A partir das equações de transporte - equações de multfluidos para regime Pfirsch-Schlüter - é mostrado [BUR-76] para uma única impureza I que:

$$n_i Z_i v_{ir} = -n_I Z_I v_{Ir} = \frac{R // B_\theta}{e B_\theta B_\phi}$$

onde n , Z e v são a densidade, nº atômico e velocidade para íons do plasma (i) e impurezas (I) e $R //$ é a força de atrito colisional entre íons e impurezas paralela ao campo magnético.

É estabelecido também que a taxa de injeção de prótons deve ser comparável a taxa de reciclagem das partículas do plasma.

A experiência foi realizada no tokamak ISX-A [BUR-78] [INN-79]. Os resultados não são muito convincentes, pois o efeito só foi verificado para o neônio, mas os autores alegam que ele será mais significativo em máquinas maiores, com raios maiores.

II.5.2. Controle do fluxo de partículas neutras

Uma nova técnica para o controle do fluxo de partículas neutras e melhora da composição do plasma tem sido testada no ST e ATC [STO-75]. Ela consiste na deposição de metal fresco (Ti ou Mo) nas paredes da câmara de vácuo, produzindo uma forte inibição no processo de reciclagem de partículas. Neste caso a técnica de injeção pulsada de gás deve necessa-

riamente ser utilizada na fase de formação da descarga para se atingir a densidade normal de operação. Desse modo, parece que os contaminantes comuns ficam presos às paredes da câmara, em vez de se reciclarem no plasma.

II.5.3. Diagnóstico por meio de injeção pulsada

A técnica de injeção pulsada já foi aplicada no tokamak T-3 em 1971 para medir o tempo de difusão do plasma [GOR-71].

A motivação para este trabalho foi o fato de \bar{n}_e ser praticamente constante durante uma fase da descarga no T-3. Havia duas hipóteses que explicavam esta constância e um modo de checá-las era através da injeção de gás.

\bar{n}_e praticamente constante podia ser o resultado de um substancial aumento no confinamento do plasma ou o equilíbrio entre um significativo aumento no fluxo de gás que provem das paredes e perdas por difusão. Então, dependendo da natureza do confinamento, quantidades adicionais de plasma comportam-se de maneiras diferentes. Se o tempo de confinamento das partículas é pequeno e a densidade de equilíbrio é determinada pelo balanço entre perdas por difusão e fluxo de gás neutro, um novo valor da densidade de equilíbrio deve se estabelecer imediatamente após a injeção de gás. Ao mesmo tempo ocorre uma mudança no fluxo total de gás neutro proveniente das paredes, o qual é proporcional ao valor do acréscimo $\Delta \bar{n}_e$ na densidade.

Ao contrário, se o tempo de confinamento é longo, o equilíbrio acima não se estabelece e a relação proporcional em

tre $\Delta \bar{n}_e$ e o fluxo de neutros não pode ser estabelecida. Desse modo são as medidas de fluxo de partículas neutras, feitas espectroscopicamente e, obviamente, influenciadas pela injeção pulsada de gás, que decidem a natureza de confinamento; transformando a injeção de gás numa espécie de diagnóstico.

Mais geralmente, a técnica de injeção pulsada pode ser utilizada para introduzir quantidades conhecidas de impurezas no plasma, para diagnóstico em geral. Este método pode ser particularmente eficiente quando se tratar de impureza originalmente inexistente no plasma, permitindo alto nível de discriminação nas medidas.

III. DESCRIÇÃO DO TBR-I, DOS DIAGNÓSTICOS USADOS E DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Neste capítulo fazemos uma descrição do TBR-I, dos instrumentos de diagnóstico disponíveis no Laboratório e usados neste trabalho e do sistema de aquisição de dados.

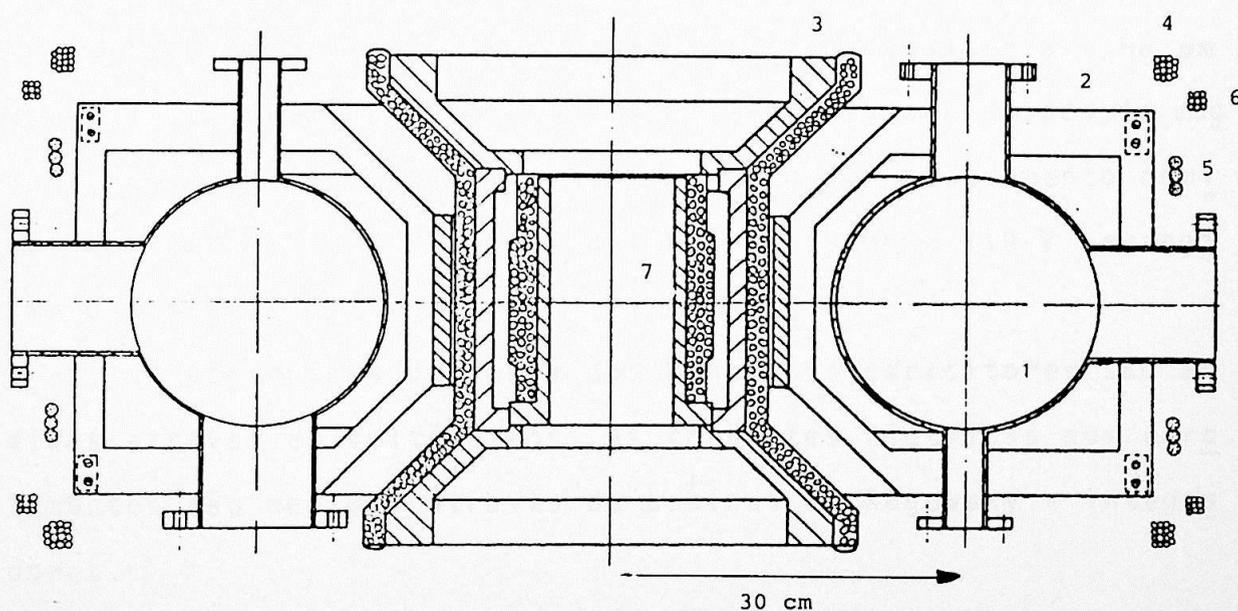
III.1. Descrição do TBR-I

O TBR-I é um tokamak de pequeno porte, projetado e construído no Instituto de Física da Universidade de São Paulo [SIM-78][SIL-80], para pesquisa e treinamento de pessoal. Na Tabela III.1 mostramos os seus principais parâmetros e na Figura III.1 uma de suas seções transversais.

A câmara de vácuo é de aço inoxidável 316 L, com paredes de 3,2 mm de espessura, tendo 18 portas de acesso. As duas metades que a compõe, são ligadas através de flanges, estando isoladas eletricamente por anéis de Viton e conectadas ao terra por dois resistores de 100Ω . Um sistema de bombeamento turbomolecular, garante uma pressão base de $1-2 \cdot 10^{-6}$ MBAR. A pressão total no interior da câmara (P_{BAS} , P_{LIM} ou P_{TOK}), é medida através de um sensor iônico, tipo Bayard-Alpert, controlado eletronicamente. Como o conjunto é calibrado para o nitrogênio, quando se mede pressão de hidrogênio é preciso corrigir o valor indicado no display, multiplicando-o por

RAIO MAIOR	R	30 cm
RAIO MENOR	a	11 cm
RAIO DO LIMITADOR	a_L	8 cm
CAMPO MAGNÉTICO TOROIDAL	B_ϕ	(4-5) kG
CORRENTE DE PLASMA	I_p	(5-15) kA
DURAÇÃO DA CORRENTE	t_{I_p}	(2-7) ms
TEMPERATURA DOS ELÉTRONS	T_e	-30 eV
DENSIDADE DE ELÉTRONS	n_e	$(2-10) \cdot 10^{12} \text{cm}^{-3}$
PRESSÃO BASE	P_{bas}	$(1-2) \cdot 10^{-6} \text{mbar}$
PRESSÃO DE TRABALHO (H_2)	P_{tok}	$-2,9 \cdot 10^{-4} \text{mbar}$
TEMPO DE CONFINAMENTO	τ_E	-0,7 ms

TAB. III.1 - PRINCIPAIS PARÂMETROS DO TBR-I.



- 1- CÂMARA DE VÁCUO E PORTAS DE ACESSO
- 2- ESPIRAS DO ENROLAMENTO TOROIDAL
- 3- TRANSFORMADOR DE AQUECIMENTO ÔHMICO
- 4,5- ENROLAMENTOS COMPLEMENTARES DO AQUECIMENTO ÔHMICO
- 6- ENROLAMENTOS EXTERNOS DO VERTICAL
- 7- ENROLAMENTO INTERNO DO VERTICAL

FIG. III.1 - SECÇÃO TRANSVERSAL DO TBR-I.

2,4 [LEH-82]. Todas as vedações são feitas com anéis de Viton.

O enrolamento toroidal está dividido em 8 blocos, cada qual contendo 14 espiras. Um banco rápido de capacitores de 1 mF x 4,50 kV e um banco lento de 360 mF x 280 V são usados para energizar o sistema.

O transformador de aquecimento ôhmico possui 88 espiras (Figura III.1). Em série com ele, há enrolamentos externos para melhorar o acoplamento com o plasma. O sistema é energizado por um banco rápido de 5 a 60 μ F x 10 kV e por um banco lento de 16,7 mF x 930 V.

O campo vertical de equilíbrio é gerado a partir de dois enrolamentos com 9 espiras cada um, situados externamente ao toróide e simetricamente ao seu plano equatorial. Há um terceiro enrolamento central com 55 espiras, que desacopla magneticamente este sistema do transformador de aquecimento ôhmico. Um banco de 70 μ F x 5 kV e outro de 40 mF x 110 V energizam o sistema.

As tensões de carga dos bancos de capacitores são medidas através de voltímetros. As correntes elétricas nos enrolamentos são medidas através de bobinas de Rogowsky e integradores.

Um oscilador do tipo Colpitts com potência de 14 kW e frequência de 8 kHz, cuja bobina do circuito tanque é o próprio transformador de aquecimento ôhmico, é utilizado para operar o TBR-I em limpeza de descarga (processo Taylor) [ELI-86]. No modo tokamak, se usa o oscilador para pré-ionização, juntamente com um filamento de tungstênio.

O acionamento dos bancos de capacitores, do oscilador e do sistema de aquisição de dados é feito através de pulsadores e atrasadores.

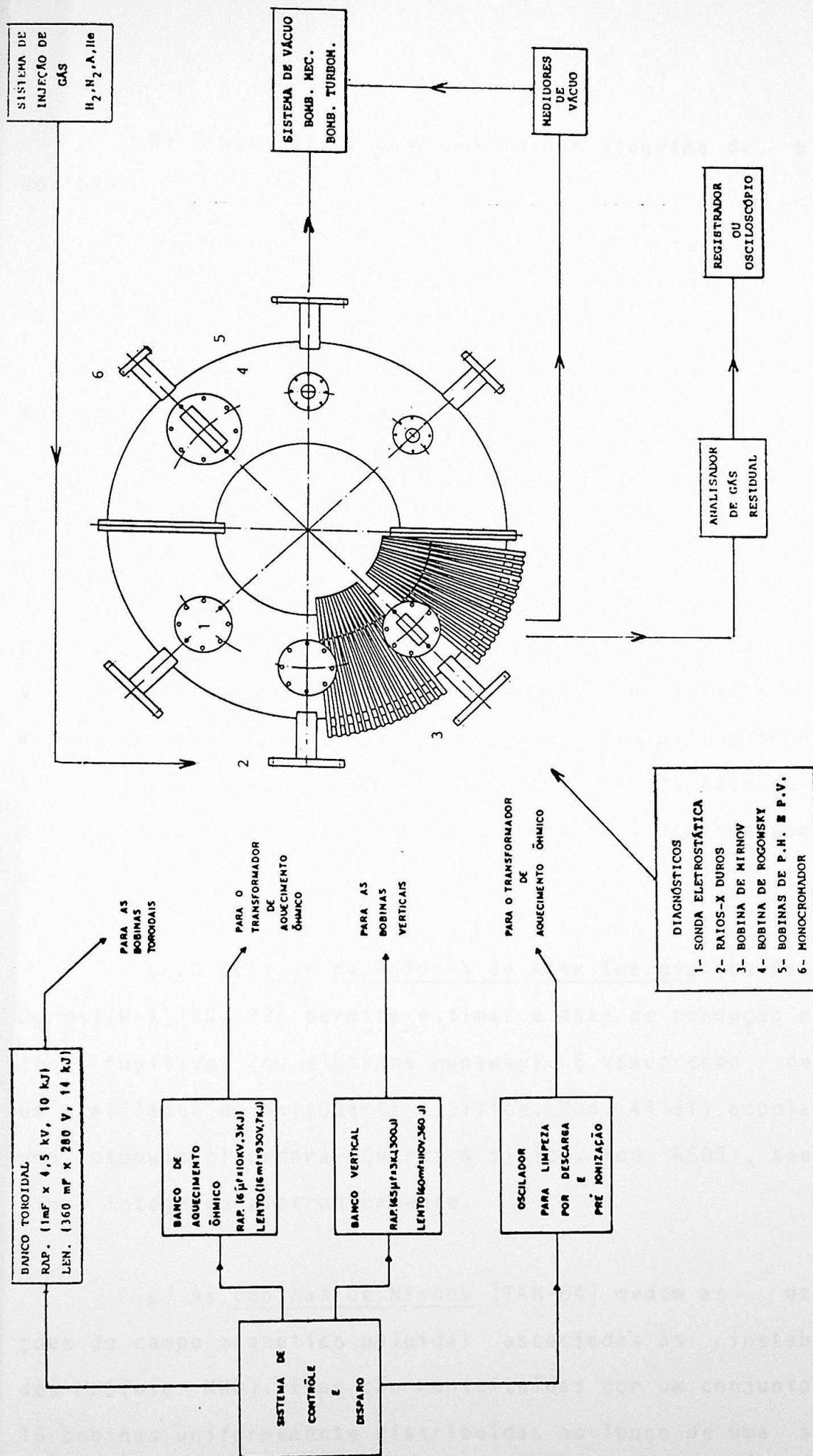


FIG. III.2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO TBR-I.

Na Figura III.2 apresentamos um diagrama de blocos do TBR-I.

III.2. Descrição dos Instrumentos de Diagnóstico

A grande maioria dos diagnósticos de que dispomos, foi construída no Laboratório.

Aqui, descrevemos parte deles, mostrando na Figura III.2 como estão distribuídos em torno do TBR-I.

a. A Sonda Eletrostática Simples [DAL-82] mede a temperatura de elétrons (T_e) e a densidade de plasma (n_p). É usado como eletrodo um fio de tungstênio, blindado eletrostaticamente por uma blindagem de cabo coaxial, com as isolações elétricas feitas por tubos de pyrex; este conjunto pode se movimentar radialmente, graças a um suporte mecânico adequado (Figura III.3).

b. O Detetor de Raios-X de Alta Energia (ou Raios-X Duros) (R-X) [BRU-82] permite estimar a taxa de produção de elétrons fugitivos (ou elétrons runaway). É usado como detetor um cintilador de NaI(Quartz & Silice, Mod. 44S51) acoplado a uma fotomultiplicadora (Quartz & Silice, Mod. AS03), sendo o sinal integrado eletronicamente.

c. As Bobinas de Mirnov [TAN-84] medem as oscilações do campo magnético poloidal associadas às instabilidades MHD(osc. MHD). Elas são constituídas por um conjunto de 16 bobinas uniformemente distribuídas ao longo de uma secção transversal do toróide (r e ψ fixos, θ variável), tendo como

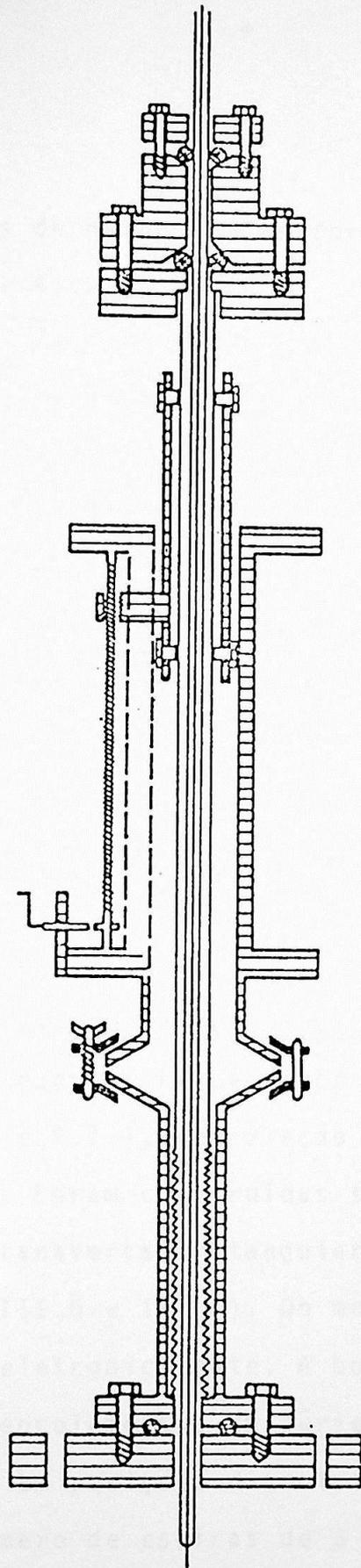


FIG. III.3 - SECÇÃO TRANSVERSAL DA SONDA
ELETROSTÁTICA E DO SEU SUPORTE
MECÂNICO.

suporte dois tubos de nylon com as formas de semi-circunferências (Figura III.4).

d. Uma Bobina de Rogowsky [UET-85] é usada para a medida da corrente de plasma (I_p). Ela foi construída sobre uma cinta de nylon com secção transversal retangular (Figura III.5), tem um espaçamento uniforme entre as espiras e possui somente um enrolamento, ao qual se segue um loop com uma única espira; de tal forma que as tensões induzidas no loop e no enrolamento são de sinais opostos, cancelando o fluxo do campo toroidal. Para eliminar ruídos eletrostáticos a bobina é blindada com papel alumínio. O sinal da bobina é integrado eletronicamente.

e. As Bobinas de Posição Horizontal e Vertical

[UET-85] medem os respectivos deslocamentos da coluna de plasma (P.H. e P.V.), em relação ao centro geométrico da câmara de vácuo. Foram construídas também sobre cintas de nylon com secção transversal retangular e blindadas com papel alumínio (Figuras III.6 e III.7). Do mesmo modo, o sinal de ambas é integrado eletronicamente. A bobina de posição horizontal tem quatro enrolamentos em série, superpostos dois a dois, com os pares em posições diametralmente opostas e uma relação entre o número de espiras de 3 para 1. A bobina de posição vertical tem uma estrutura idêntica a de posição horizontal, com a diferença de que a relação entre o número de espiras é de 1 para 1. Os sinais espúrios devido aos campos toroidal, vertical e aquecimento ôhmico são compensados eletronicamente em ambas as bobinas.

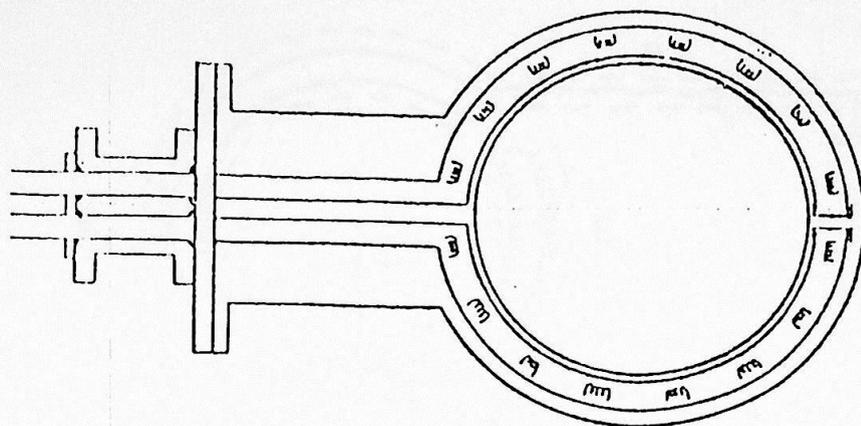


FIG. III.4 - ESTRUTURA MECÂNICA DAS BOBINAS DE MIRNOV.

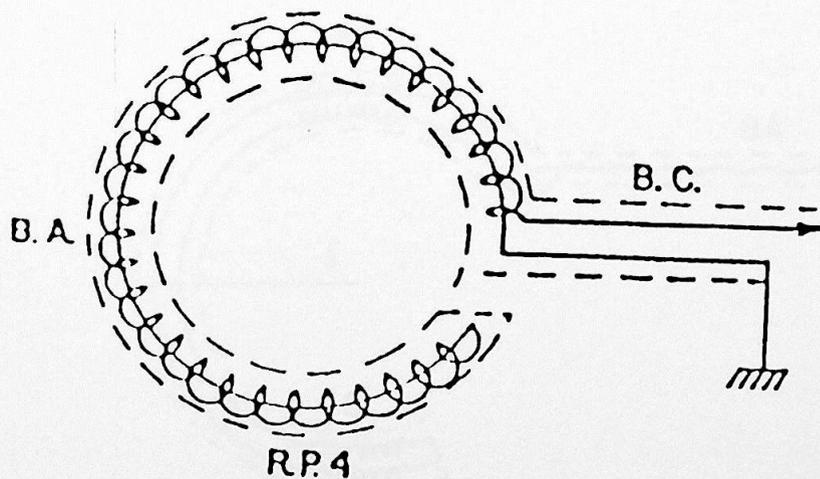


FIG. III.5 - BOBINA DE ROGOWSKY PARA A MEDIDA DA CORRENTE DE PLASMA. BA E BC SÃO RESPECTIVAMENTE BLINDAGEM DE PAPEL ALUMÍNIO E BLINDAGEM DO CABO.

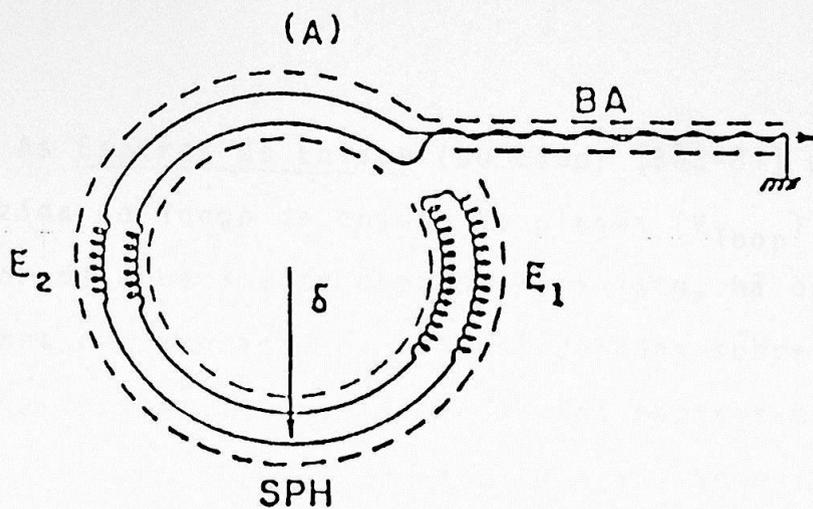


FIG. III.6 - BOBINA DE POSIÇÃO HORIZONTAL SPH DE RAIO δ . E_1 E E_2 SÃO RESPECTIVAMENTE OS ENROLAMENTOS EXTERNO E INTERNO, E BA É A BLINDAGEM DE PAPEL ALUMÍNIO.

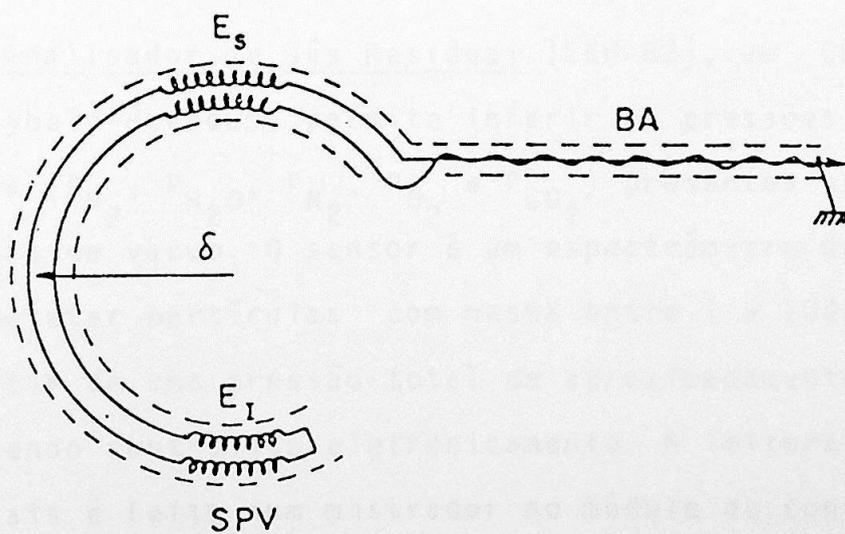


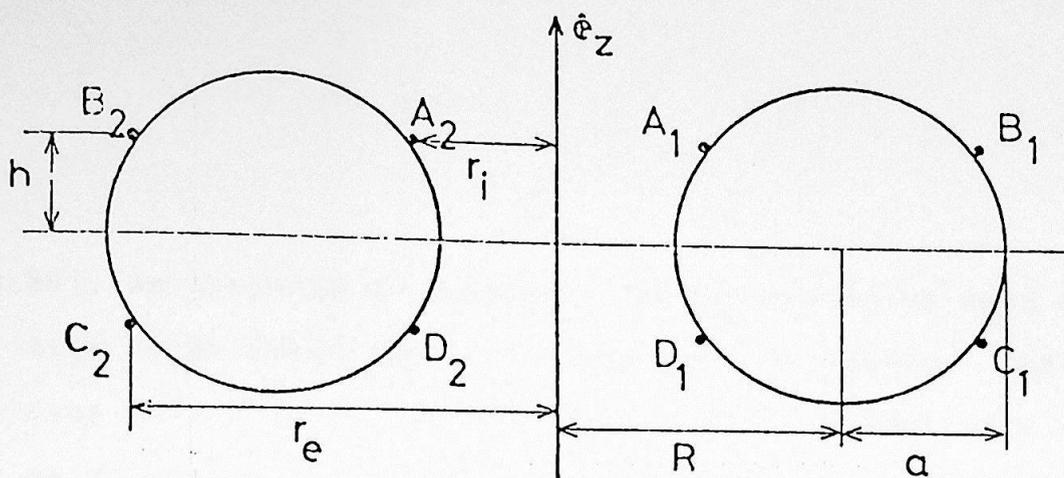
FIG. III.7 - BOBINA DE POSIÇÃO VERTICAL SPV DE RAIO δ . E_S E E_I SÃO RESPECTIVAMENTE OS ENROLAMENTOS SUPERIOR E INFERIOR.

f. As Espiras de Enlace (ou Loop) [BOS-81] medem a tensão induzida ao longo da coluna de plasma (V_{loop}) pelo transformador de aquecimento ôhmico. Para isto, há quatro espiras de cobre com isolamento da teflon, coladas sobre a superfície externa do vaso. A disposição destas espiras é mostrada na Figura III.8. Contudo, das quatro espiras, somente a superior-externa é usada para medidas, tendo o seu sinal atenuado por um divisor resistivo.

g. O Monocromador [SAN-83] permite obter médias da temperatura de elétrons (T_e) na região central do plasma. Neste trabalho, contudo, foi usado na observação de variações na intensidade da linha H_β do hidrogênio (H_β); como veremos no capítulo seguinte. Apresentamos na Figura III.9 um esquema do monocromador.

h. O Analizador de Gás Residual [LEH-82], um Quadrupol Q200 da Leybold-Heraeus, permite inferir as pressões parciais dos gases (P_{H_2} , P_{H_2O} , P_{N_2} , P_{O_2} e P_{CO_2}) presentes no interior da câmara de vácuo. O sensor é um espectrômetro de massa, que pode detetar partículas com massa entre 1 e 200 e trabalha a partir de uma pressão total de aproximadamente $5 \cdot 10^{-4}$ MBAR, sendo controlado eletronicamente. A leitura das pressões parciais é feita num mostrador no módulo de controle ou num osciloscópio.

Existem outros diagnósticos construídos ou em construção no Laboratório que não foram utilizados neste trabalho, são eles: uma sonda de íons para a medida da sua temperatura [CrJ-86], um conjunto de bobinas magnéticas que permite determinar a forma da secção transversal da coluna de plasma



$$r_i = 0.204\text{m}$$

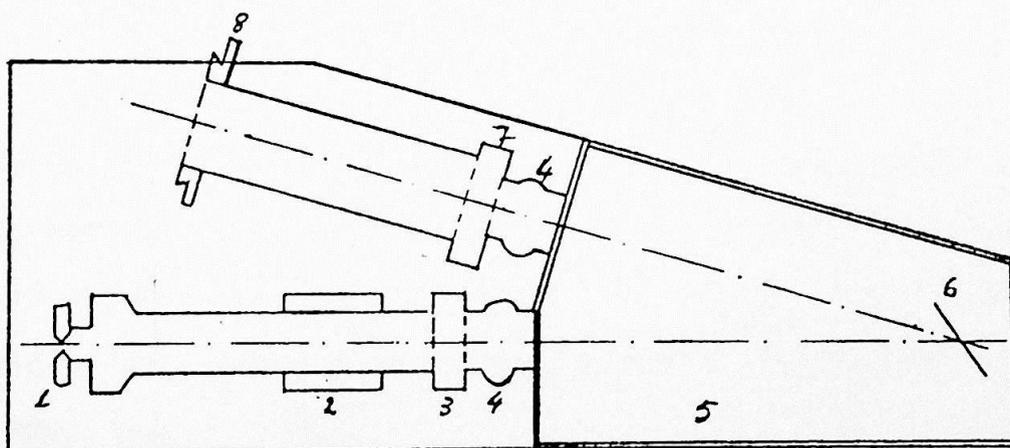
$$r_e = 0.396\text{m}$$

$$h = 0.057\text{m}$$

$$R = 0.300\text{m}$$

$$a = 0.110\text{m}$$

FIG. III.8 - POSIÇÕES DAS ESPIRAS DE ENLACE (OU LOOP).



- 1- FENDA DE ENTRADA COM AJUSTE MICROMÉTRICO
- 2- AJUSTE DE FOCO DE ENTRADA
- 3- LENTE DE ENTRADA ACROMÁTICA COM 400mm DE DISTÂNCIA FOCAL E 3 POLEGADAS DE DIÂMETRO
- 4- VEDAÇÃO DE LUZ
- 5- CAIXA PRETA
- 6- REDE DE DIFRAÇÃO COM BLAZE EM TORNO DE 5000 Å, QUADRADA COM 80 cm DE LARGURA E COM 2160 ℓ/mm
- 7- LENTE DE SAÍDA ACROMÁTICA COM 800mm DE DISTÂNCIA FOCAL E 2 POLEGADAS DE DIÂMETRO
- 8- SUPORTE PARA FOTOMULTIPLICADQRA
- 9- BASE DE FERRO RÍGIDO

FIG. III.9 - MONOCROMADOR.

[CON-86], um conjunto de detetores de raios-X moles cuja emissão está relacionada com a atividade MHD na região central do plasma [VAN-87], um interferômetro de microondas para a medida da densidade de plasma [SIL-88] e uma sonda diferencial emissiva para a medida direta do potencial de plasma [RIB-87].

III.3. Descrição do Sistema de Aquisição de Dados

Mostramos na Figura III.10 um diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados e na Tabela III.2 uma relação do equipamento que compõe este sistema.

Durante um pulso tokamak, o sinal gerado por um instrumento de diagnóstico passa através de um atenuador, sendo a seguir digitalizado (por um conversor analógico digital) e armazenado num módulo de memória. Depois da descarga, é reconvertido num sinal analógico e observado na tela de um osciloscópio de armazenamento, de onde é fotografado. A fotografia é transposta para papel vegetal milimetrado, permitindo a leitura da amplitude do sinal.

Os sinais detetados tem que ser atenuados para não ultrapassarem o nível máximo de entrada dos digitalizadores, que para um sinal alternado é de 250 mV.

Recentemente foi acoplado ao sistema um microcomputador de 16 bites, compatível com o IBM-PC, que agilizará enormemente a obtenção de dados.

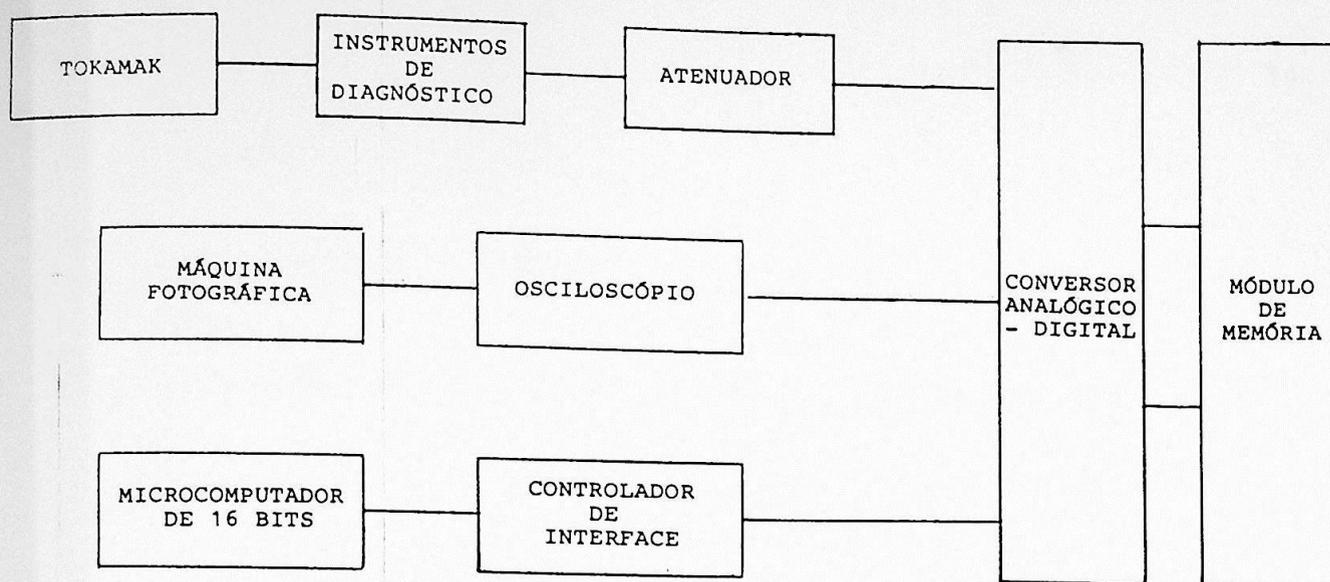


FIG. III.10 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

EQUIPAMENTO	MARCA	MÓDELO
MEMÓRIA	LE CROY	8800A
CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL	LE CROY	2264
CONTROLADOR* DE INTERFACE	C.A.E.N.	C111
MICROCOMPUTADOR*	MICROTEC	XT2002
OSCILOSCÓPIOS	TEKTRONIX	7613 e 7633

* Instalados em Nov/86

TAB. III.2 - EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

IV. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE GÁS

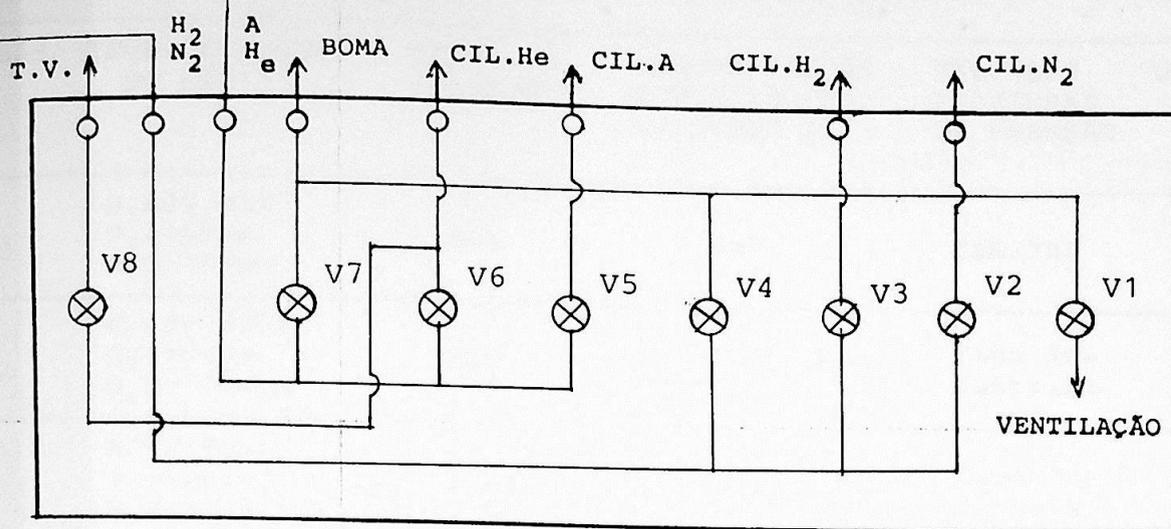
Descrevemos neste capítulo, o sistema de injeção de gás do TBR-I, em especial a implantação da injeção pulsada de gás e a medida dos seus parâmetros característicos.

IV.1. Implantação do Sistema de Injeção Pulsada de Gás

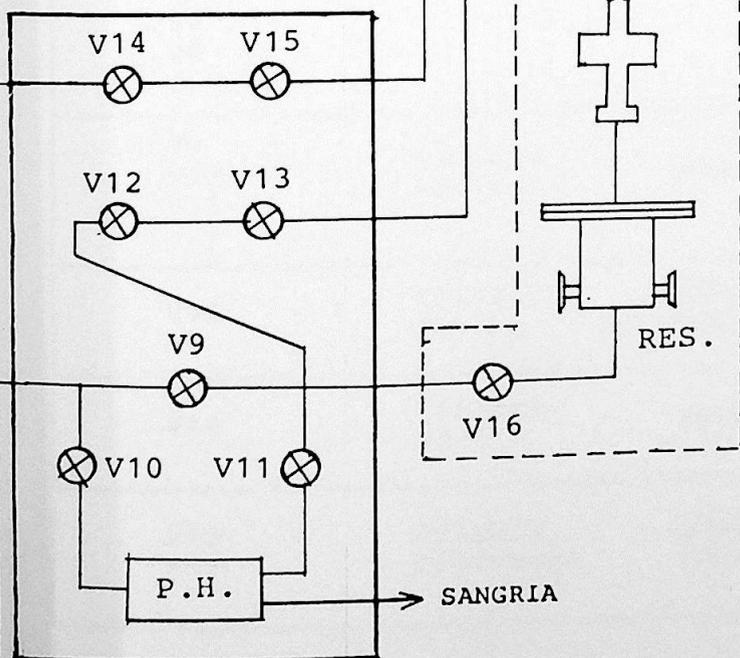
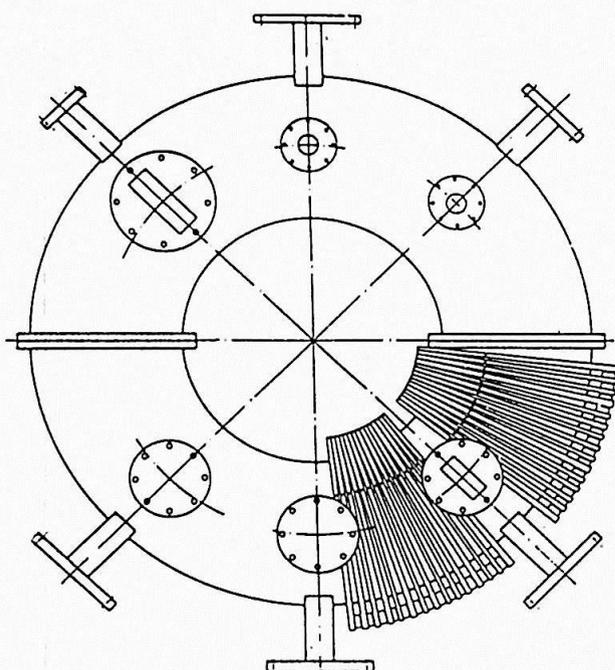
O TBR-I é geralmente operado com hidrogênio, mas outros três gases (He, A e N_2) podem ser introduzidos no vaso quando desejado [FAG-82] [SAN-83] [TAN-85]. Na Tabela IV.1 damos as especificações destes gases.

Nas Tabelas IV.2, IV.3 e IV.4 relacionamos os demais componentes do sistema de injeção de gás, cujo esquema geral mostramos na Figura IV.1.

Originalmente, este sistema era composto por dois painéis com válvulas agulha (um para a escolha do gás a ser usado e outro para o controle da entrada de gás no vaso), dois dutos ligando os painéis, um purificador de hidrogênio e uma bomba mecânica de palhetas rotativas. Por um dos dutos flui He ou A, enquanto pelo outro flui H_2 ou N_2 . O uso do purificador de hidrogênio, que permite obter pureza da ordem de até 1 parte em 10 milhões [CAR-82], visa sobretudo diminuir o número atômico efetivo (Z_{eff}) do plasma. A bomba mecânica é usada para evacuar todo o sistema de injeção, quando se quer operá-lo.



D.



- BOMA - BOMBA MECÂNICA AUXILIAR
- CIL. - CILINDROS
- D. - DUTOS
- P.H. - PURIFICADOR DE HIDROGÊNIO
- RES. - RESERVATÓRIO DE GÁS
- T.V. - TESTE DE VAZAMENTO
- V. - VÁLVULAS
- V.R. - VÁLVULA RÁPIDA

FIG.IV.1 - ESQUEMA GERAL DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE GÁS.

GÁS	TEOR DE PUREZA DO GÁS**	TIPO DE CILINDRO*	VOLUME DE GÁS FORNECIDO NO CILINDRO Δ	VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO	OBSERVAÇÕES
H ₂	H ₂ ≥ 99,95% O ₂ ≤ 10vpm H ₂ O ≤ 10vpm	B50	7,5m ³	HBS-300	Gás de qualidade industrial
N ₂	N ₂ ≥ 99,995% O ₂ ≤ 10vpm H ₂ O ≤ 10vpm	B50	10m ³	Tipo Industrial	Gás de alta pureza
A	A ≥ 99,995% O ₂ ≤ 5vpm H ₂ O ≤ 5vpm	B50	10m ³	Tipo Industrial	Gás de alta pureza
HE	He ≥ 99,995% O ₂ ≤ 5vpm H ₂ O ≤ 5vpm	B50	9,0m ³	HBS-300	Gás de alta pureza

**vpm = parte por milhão em volume

* B50 = 50l de água

Δ a 21 C e 200 Kg/cm²

Dados obtidos em [CaO - 81]

TAB.IV.1 - ESPECIFICAÇÃO DOS GASES USADOS NA OPERAÇÃO DO TBR-I [CAO-81]

Designação do Equipamento na Figura IV.1	Tipo	Marca	Môdelo
V1 V2 V3 V4 V5 V6 V7 V8	Válvula Agulha	METALÚRGICA DETROIT S.A.	"AGULHA" em aço inoxidável; "CORPO" de latão, com conexões "POLY-FLO" de 1/4" nas extremidades
V9 V10 V11	Válvula Agulha	WHITEY	SS-31R54 (Série 31)
V12	Válvula Agulha	EDWARDS HIGH VACUUM	LB1B
V14	Válvula Agulha	NUPRO COMPANY	B4MG
V13 V15	Válvula Diafragma	EDWARDS HIGH VACUUM	SPEEDVALVE SC-5

TAB.IV.2 - ESPECIFICAÇÃO DAS VÁLVULAS USADAS NOS PAINÉIS DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE GÁS.

Designação do Equipamento na Figura IV.1	Tipo	Marca	Modelo
D	Tubos de Polietileno	METALÚRGICA DETROIT S.A.	1/4" de diâmetro externo
BOMA	Bomba Mecânica de Pa-lhetas Rota-tivas com dois Está-gios	WELCH CIENTIFIC COMPANY	1402
P.H.	Purificador de Hidrogê-nio	RESOURCE SYSTEMS INC.	RSD-1

TAB.IV.3 - ESPECIFICAÇÃO DO RESTANTE DO EQUIPAMENTO USADO NO SISTEMA DE INJEÇÃO DE GÁS.

Designação do Equipamento na Figura IV.1	Tipo	Marca	Modelo
V16	Válvula Agulha	EDWARDS HIGH VACUUM	LV-5
RES.	Reservató-rio de Gás	IFUSP	Em Aço Inox 316 (Veja Figu-ra IV.3)
V.R.	Válvula Piezoelétrico de Ação Rápida	VEECO INSTRUMENTS INC.	PV-10

TAB.IV.4 - ESPECIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO USADO NO RAMO DE INJEÇÃO PULSADA DE GÁS.

Para a implantação da injeção pulsada de gás, dividimos o duto de H_2/N_2 em dois, à saída do purificador (Fig. IV.1). Desse modo, por um dos ramos da bifurcação se dá a entrada contínua de gás no vaso, através da qual se estabelece a pressão de trabalho (P_{LIM} ou P_{TOK}) para operação do TBR-I; enquanto que pelo outro ramo se dá a injeção pulsada de gás, graças a utilização de uma válvula piezoelétrica de ação rápida (V.R.) PV-10/Veeco (Figura IV.6).

Chegamos a desenvolver no Laboratório uma válvula eletromecânica de ação rápida, cujo projeto e resultados preliminares apresentamos no Apêndice B. Porém, decidimos utilizar a válvula comercial PV-10 por ser mais compacta.

Para operarmos a PV-10 foi montado um circuito eletrônico (Figura IV.2) que fornece pulsos de tensão, ajustáveis em amplitude ($AMP = 0 \rightarrow 180 \text{ V}$) e duração ($DUR = 0,5 \rightarrow 5,0 \text{ ms}$). É ainda possível somar aos pulsos uma tensão contínua ($NIV.DC = 25 \rightarrow 50 \text{ V}$), também ajustável. Além destas possibilidades de controle sobre a quantidade de gás injetada, temos um reservatório de gás cuja pressão interna (P_{RES}) ajustamos por uma válvula agulha (Fig. IV.1). Calculamos as dimensões deste reservatório de tal modo, que reajustes da P_{RES} são sejam necessários depois de algumas dezenas de disparos da V.R.. Na Figura IV.3 temos uma vista explodida do reservatório e abaixo dela uma foto do mesmo. Os dois acessos laterais existentes, se destinam a medidores de pressão que cobrem faixas diferentes de valores.

O procedimento detalhado para a injeção normal de gás (contínua e pulsada), consta em memorando interno do Laboratório [SAN-86], mas em linhas gerais consiste basicamente em evacuar, inicialmente, todo o sistema de injeção com a bom

ba mecânica, introduzir o gás desejado no duto correspondente manipulando as válvulas adequadas e regular a pressão no vaso e no reservatório pelas válvulas V12 e V16 respectivamente.

IV.2. Medida dos Parâmetros Característicos da Injeção Pulsada de Gás

Para caracterizar o sistema de injeção pulsada de gás (SIPUG) implantado, foram medidos os dois seguintes parâmetros: o intervalo de tempo t_{INCRP} necessário para que o gás injetado se incorpore ao volume do vaso e o fluxo de gás $Q_{\text{V.R.}}$ (throughput) da V.R. em função da pressão no reservatório P_{RES} .

O primeiro (t_{INCRP}) é definido como o intervalo de tempo entre o instante em que a V.R. é acionada e o instante em que a presença de gás no vaso é percebida pelos diagnósticos de plasma.

O segundo ($Q_{\text{V.R.}}$) é definido detalhadamente no Apêndice A, sendo expresso em termos da derivada

$$Q = \frac{d(pV)}{dt}$$

e permite estimar a quantidade de gás injetada num disparo da válvula.

A medida de t_{INCRP} foi feita com e sem plasma e usando diagnósticos diferentes em cada um dos casos.

Na medida sem plasma, as grandezas observadas foram a pressão parcial de hidrogênio (P_{H_2}) e a pressão total (P_{VASO}).

Na medida com plasma, feita somente em limpeza por descarga, as grandezas escolhidas foram a corrente (I_p) e a

densidade (n_p) de plasma e a tensão de enlace (V_{LOOP}).

Os instrumentos utilizados na observação das variações induzidas pela injeção pulsada de gás nas grandezas acima, foram descritos no Capítulo III.

O critério utilizado para a escolha do valor mais real de t_{INCORP} , entre os cinco obtidos, foi o de menor tempo. Isto porque os diferentes tempos de resposta, de cada um dos instrumentos de diagnóstico, podem mascarar as medidas. Em particular, a medida das variações de P_{H_2} e P_{VASO} é ainda prejudicada pelo difícil acesso do gás aos sensores. No caso da I_p , n_p e V_{LOOP} o efeito é mais direto.

Os valores medidos de t_{INCORP} e as condições experimentais em que foram encontrados, estão nas Tabelas IV.5 e IV.6. Na Figura IV.4 mostramos sinais típicos destas medidas.

De acordo com o critério estabelecido acima, tomamos como o valor de t_{INCORP} aquele igual a 2,3 ms; medido a partir da n_p e nas seguintes condições de disparo da V.R.: DUR = 2,4 ms, AMP = 180 V e NIV.DC = 23 V.

Embora não caracterize o SIPUG, outro parâmetro importante é o tempo $t_{B.V.}$ de bombeamento do vaso, definido e calculado também no Apêndice A. Isto porque, podemos estimar a quantidade de gás injetada, removida pelas bombas de vácuo no tempo t_{I_p} de duração da corrente de plasma, comparando:

$$t_{B.V.} \cong 1,3 \text{ s} \gg t_{I_p} \cong 0,007 \text{ s}$$

Assim, pode-se supor que praticamente todo gás injetado permanece no vaso durante os disparos no modo tokamak. Veremos no capítulo seguinte a importância deste fato.

Para o cálculo de $Q_{v.r.}$ usamos uma aproximação da ex-

Diagnóstico	t_{incorp}
Pressa Parcial de Hidrogênio	19,0ms
Pressão Total	4,0ms
Condições Experimentais	
$P_{\text{bas.}} = 1,4 \cdot 10^{-6}$ mbar	NIV. DC = (23 ± 1) V
	AMP. = (185 ± 5) V
	DUR. = $(2,2 \pm 0,1)$ ms
	$P_{\text{res}} = 500$ Torr
Condições do RGA	
$I_p/A = 10^{-11}$	Time Const./ms = 30
Line Width = 1,0	Mode = Var.
Emission = 21_e /mA	Mode = Manual

TAB.IV.5 - VALORES MEDIDOS DE t_{INCORP} SEM PLASMA.

Diagnósticos	t_{incorp}
Corrente de Plasma	2,6ms
Densidade de Plasma*	2,3ms
Tensão de Enlace	2,6ms
Condições Experimentais	
$P_{\text{lim.}} \approx 1,2 \cdot 10^{-3}$ mbar	
$V_{\text{osc}} \approx 6$ KV	NIV.DC = (23 ± 1) V
$I_{\text{bob.tor}} \approx 175$ A	AMP. = (180 ± 5) V
Dur.Pul.Limp. ≈ 37 ms	DUR. = $(2,4 \pm 0,1)$ ms
	$P_{\text{res}} = 800$ Torr
* $r_{\text{sonda}} = 7,5$ cm	

TAB.IV.6 - VALORES MEDIDOS DE t_{INCORP} COM PLASMA.

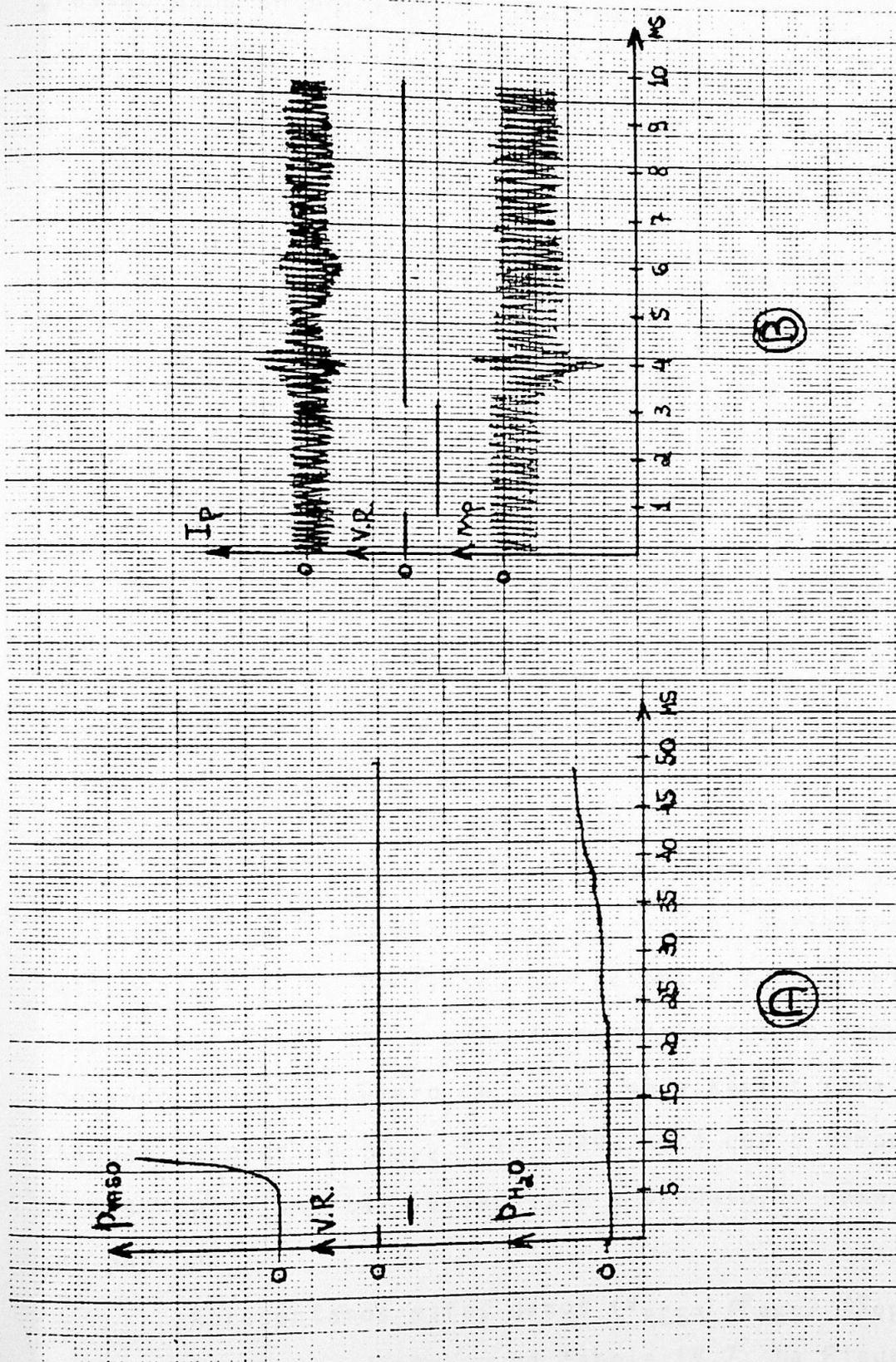


FIG. IV.4 - SINAIS TÍPICOS DAS MEDIDAS DE t_{incorp} .

a) Medidas sem Plasma

b) Medidas com Plasma

pressão dada anteriormente, desse modo

$$Q_{v.r.} = \frac{\Delta P_{RES}}{\Delta t_{RES}} \cdot V_{RES}$$

onde V_{RES} é o volume do reservatório, ΔP_{RES} as variações de pressão no mesmo decorrentes da injeção de gás e Δt_{RES} os intervalos de tempo em que estas variações ocorrem. Note-se que esta aproximação só foi possível porque o volume a ser esvaziado, V_{RES} , é fixo e as variações de pressão e tempo medidas com boa exatidão.

Para obtermos estes dados, adotamos o seguinte procedimento experimental (veja Fig. IV.1): inicialmente evacuamos o reservatório até a menor pressão possível ($P_{BAS-RES} \cong 4.10^{-1}$ TORR) usando a bomba mecânica auxiliar (BOMA), para em seguida o preencher com hidrogênio a uma pressão de 800 TORR. Posteriormente, acoplamos ao circuito acionador da V.R. um gerador/controlador de pulsos e ajustamos os valores dos parâmetros que caracterizam o pulso de tensão que aciona a V.R.. Finalmente, disparamos a V.R. até a pressão no reservatório atingir 200 TORR, anotando sempre o número de pulsos necessários para se ter variações de pressão $\Delta P_{RES} = 10$ TORR; note que o tempo Δt_{RES} para se obter uma tal variação, é o produto do número de pulsos por DUR.

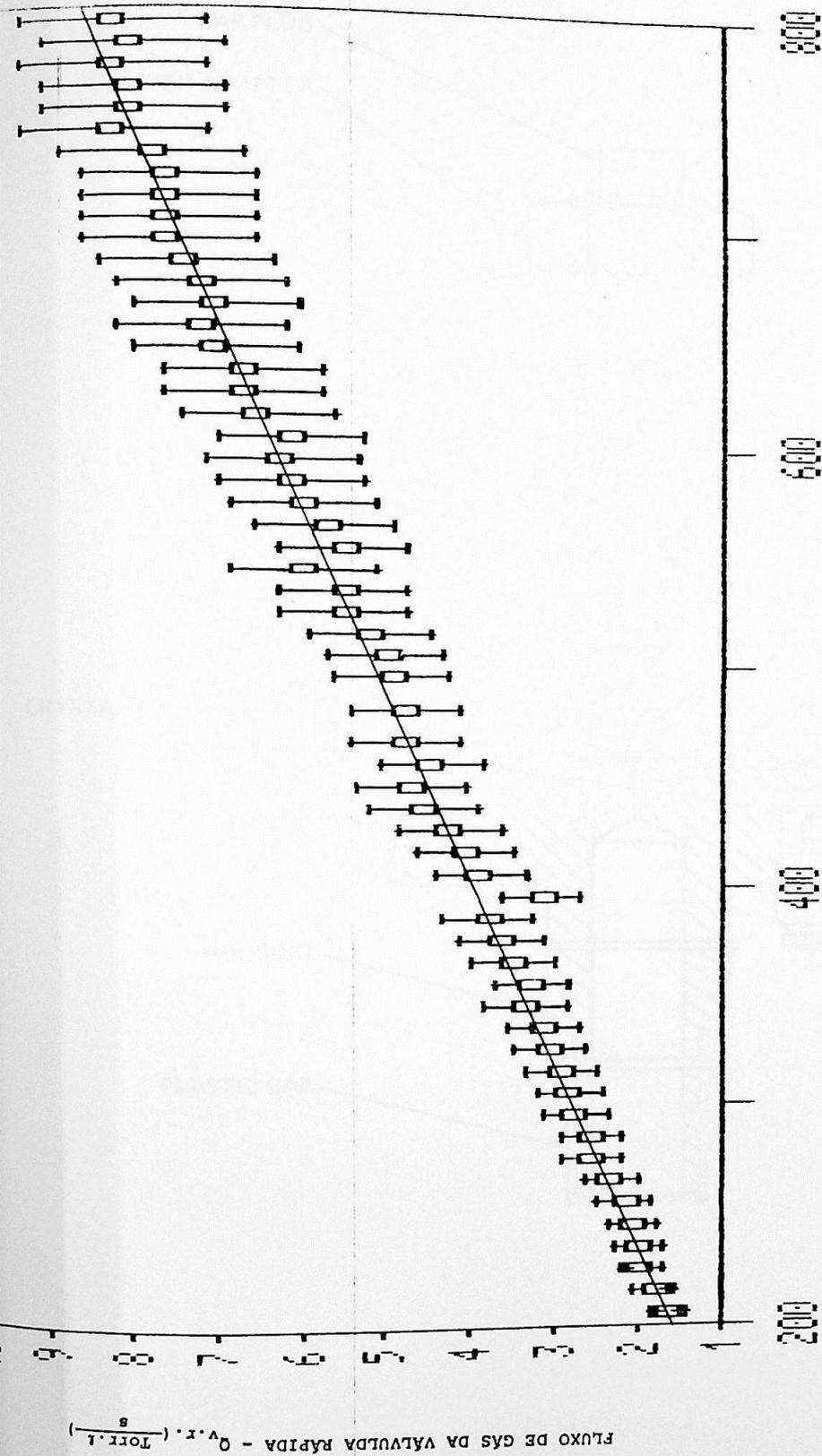
Apresentamos estes dados (V_{RES} , ΔP_{RES} , Δt_{RES}) e os valores calculados de $Q_{V.R.}$ na Tabela IV.7. Na Figura IV.5 mostramos o ajuste numérico destes $Q_{V.R.}$ calculados em função da pressão no reservatório.

Pressão inicial (torr)	Pressão final (torr)	Pressão média (torr)	Variacao pressão (torr)	N. de Pulsos da Valvula	Tempo de injecao (ms)	Throughput da valvula rap. (torr.l/s)
800	790	795	10	34	163	8.4 1.2
790	780	785	10	35	168	8.2 1.1
780	770	775	10	34	163	8.4 1.2
770	760	765	10	35	168	8.2 1.1
760	750	755	10	35	168	8.2 1.1
750	740	745	10	34	163	8.4 1.2
740	730	735	10	36	173	7.9 1.1
730	720	725	10	37	178	7.7 1.1
720	710	715	10	37	178	7.7 1.1
710	700	705	10	37	178	7.7 1.1
700	690	695	10	37	178	7.7 1.1
690	680	685	10	38	182	7.5 1.1
680	670	675	10	39	187	7.3 1.0
670	660	665	10	40	192	7.1 1.0
660	650	655	10	39	187	7.3 1.0
650	640	645	10	40	192	7.1 1.0
640	630	635	10	42	202	6.8 1.0
630	620	625	10	42	202	6.8 1.0
620	610	615	10	43	206	6.6 0.9
610	600	605	10	46	221	6.2 0.9
600	590	595	10	45	216	6.3 0.9
590	580	585	10	46	221	6.2 0.9
580	570	575	10	47	226	6.1 0.9
570	560	565	10	49	235	5.8 0.8
560	550	555	10	51	245	5.6 0.8
550	540	545	10	47	226	6.1 0.9
540	530	535	10	51	245	5.6 0.8
530	520	525	10	51	245	5.6 0.8
520	510	515	10	54	259	5.3 0.7
510	500	505	10	56	269	5.1 0.7
500	490	495	10	57	274	5.0 0.7
490	470	480	20	118	566	4.8 0.7
470	460	465	10	59	283	4.8 0.7
460	450	455	10	63	302	4.5 0.6
450	440	445	10	60	288	4.8 0.7
440	430	435	10	62	298	4.6 0.6
430	420	425	10	66	317	4.3 0.6
420	410	415	10	69	331	4.1 0.6
410	400	405	10	72	346	4.0 0.6
400	390	395	10	89	427	3.2 0.4
390	380	385	10	74	355	3.9 0.5
380	370	375	10	78	374	3.7 0.5
370	360	365	10	80	384	3.6 0.5
360	350	355	10	86	413	3.3 0.5
350	340	345	10	84	403	3.4 0.5
340	330	335	10	90	432	3.2 0.4
330	320	325	10	92	442	3.1 0.4
320	310	315	10	96	461	3.0 0.4
310	300	305	10	100	480	2.9 0.4
300	290	295	10	102	490	2.8 0.4
290	280	285	10	109	523	2.6 0.4
280	270	275	10	111	533	2.6 0.4
270	260	265	10	121	581	2.4 0.3
260	250	255	10	130	624	2.2 0.3
250	240	245	10	138	662	2.1 0.3
240	230	235	10	141	677	2.0 0.3
230	220	225	10	144	691	2.0 0.3
220	210	215	10	157	754	1.8 0.3
210	200	205	10	173	830	1.6 0.2

$$V_{res} = (0,137 \pm 0,003) \ell$$

$$Q_{v.r.} = \frac{\Delta P_{res}}{\Delta t_{res}} \cdot V_{res}$$

TAB.IV.7 - VALORES DE $Q_{v.r.}$ CALCULADOS E P_{res} CORRESPONDENTES.



PRESSÃO NO RESERVATÓRIO DE GÁS - P_{res} (Torr)

$$Q_{v.r.} = A_1 + A_2 \cdot P_{res}$$

$$A_1 = (-0.78 \pm 0.18) \text{ Torr.l/s} \quad A_2 = (0.01186 \pm 0.00047) \text{ l/s} \quad \chi^2_{red} = 0.088$$



FIG. IV.5 - GRÁFICO DE $Q_{v.r.}$ x P_{res}

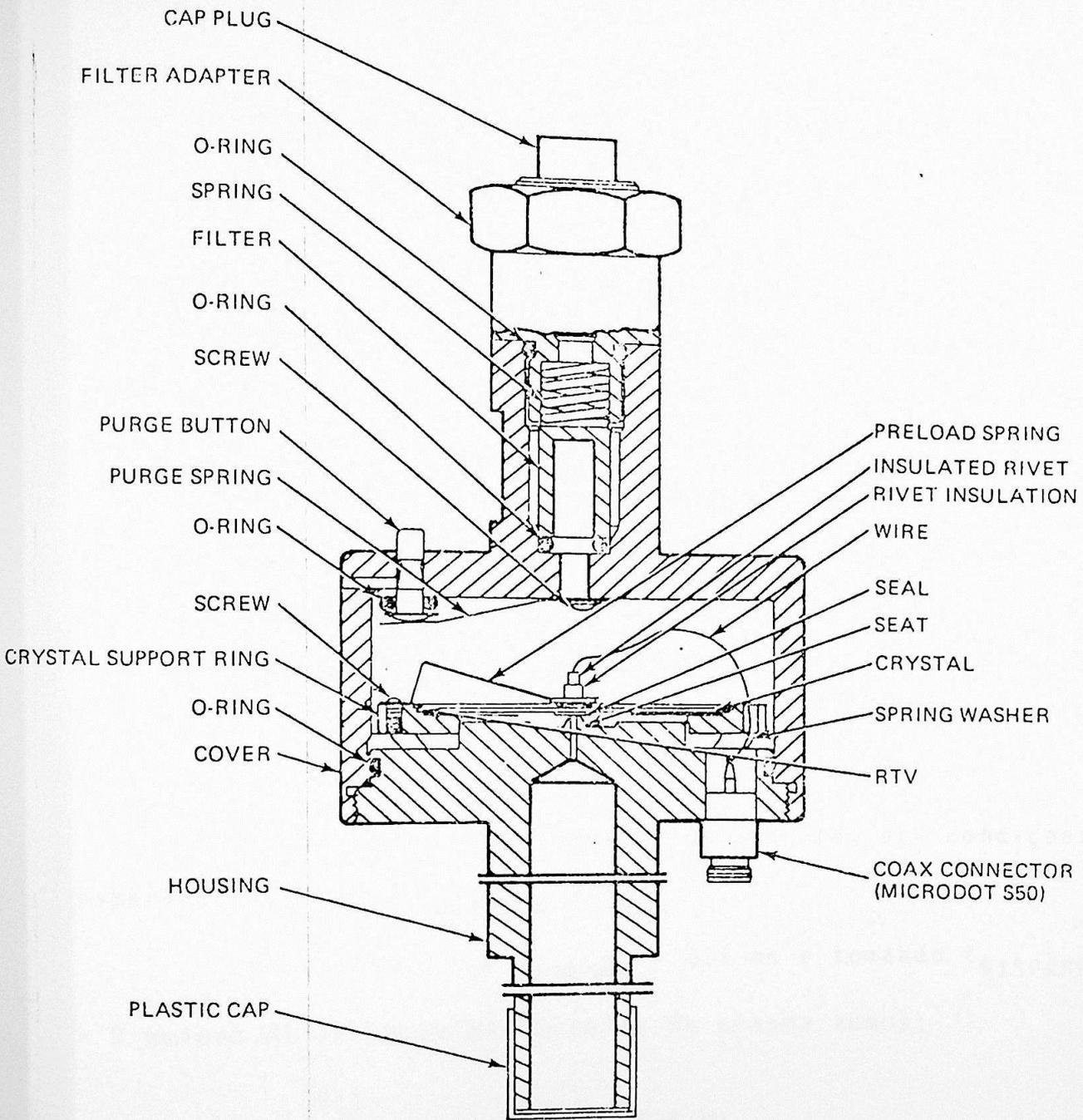


FIG. IV.6 - SEÇÃO TRANSVERSAL DA VÁLVULA RÁPIDA PV-10

V. DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO TBR-I COM O SIPUG

Relatamos a seguir, o trabalho realizado para estabelecer as condições de operação do TBR-I com a injeção pulsada de gás.

O critério utilizado para definir quais as melhores condições, foi maximizar o acréscimo de densidade de plasma decorrente da injeção pulsada de gás. O procedimento adotado na busca desse máximo, foi determinar os valores convenientes dos parâmetros que definem o disparo da V.R. (AMP, DUR, NIV.DC, $t_{DISPARO}$ e P_{RES}).

Discutiremos inicialmente, no entanto, as condições esperadas quanto ao $t_{DISPARO}$ e P_{RES} .

Considerando que $t_{INCRP} = 2,3$ ms e tomando $t_{DISPARO} = 0$ quando da formação da corrente de plasma temos:

$$-3 \text{ ms} \stackrel{(1)}{\lesssim} t_{DISPARO} \stackrel{(2)}{\lesssim} + 0,5 \text{ ms}$$

Desrespeitar a condição (1) equivale a disparar em modo tokamak numa pressão de preenchimento maior. Desrespeitar a condição (2), por outro lado, significa injetar gás quando as condições de plasma já se deterioraram tanto, que a ionização do gás é muito pequena, podendo-se confundir uma variação da densidade de plasma com sua flutuação normal.

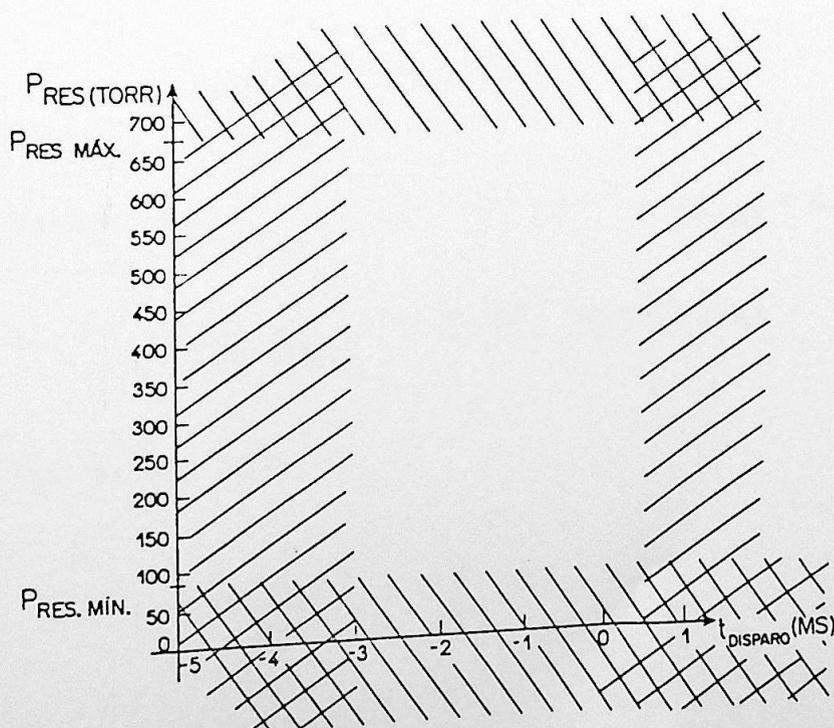
Quanto a P_{RES} , arbitramos os seguintes limites:

$$0,03 n_{\text{PREENCH}}^{(3)} \lesssim n_{\text{INJ}}^{(4)} \lesssim n_{\text{PREENCH}} \quad ; \quad n_{\text{PREENCH}} = 7,0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

Injetando uma quantidade de gás inferior aquela estabelecida na condição (3), podemos confundir de novo variação de densidade com flutuação, numa situação em que o erro na medida anula todo o seu significado. Se a condição (4) não for satisfeita, a quantidade de gás injetada é tão grande que o plasma é sufocado por ela, morrendo abruptamente; isto porque o gás permanece no vaso por cerca de $t_{B.V.} \approx 1,3 \text{ s}$ e não há energia disponível para transformá-lo em plasma.

Os limites (1), (2), (3) e (4) resultam no diagrama abaixo, onde poderão ser observados os efeitos significativos da injeção pulsada de gás.

Observe-se que as condições (3) e (4) foram convertidas em $P_{\text{RES. MIN}}$ e $P_{\text{RES. MAX}}$ no diagrama. Isto foi feito usando a definição de fluxo de gás e o ajuste numérico de $Q_{V.R.} \times P_{\text{RES}}$, dados no Capítulo IV. Mostramos abaixo, esta conversão para o caso de



$P_{RES.M\bar{A}X}$

Calcularemos primeiro a densidade equivalente à pressão P_{TOK} de disparo em modo tokamak.

$$P_{TOK} = 2,4(1,2 \cdot 10^{-4}) \text{ mbar} = 2,88 \cdot 10^{-1} \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$$

Para $T = 300 \text{ K}$

$$n = \frac{p}{kT} = n_{PREENCH} \cong 7,0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

A condição (4) estabelece que:

$$n_{INJ.MAX} \cong n_{PREENCH}$$

Assim, o número máximo de partículas a ser injetado é:

$$N_{INJ.MAX} = n_{INJ.MAX} \times V_{VASO}$$

Sendo $n_{INJ.MAX} = 7,0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ e $V_{VASO} = 8 \cdot 10^4 \text{ cm}^3$,

$$N_{INJ.MAX} \cong 5,6 \cdot 10^{17} \text{ partículas}$$

Por outro lado

$$Q = \frac{d}{dt}(pV) = \frac{d}{dt}(NkT)$$

ou simplificando

$$Q \cong \frac{\Delta N}{\Delta t} \cdot kT$$

No nosso caso

$$Q_{\text{INJ. MAX}} \cong \frac{N_{\text{INJ. MAX}}}{\Delta t_{\text{RES}}} k.T$$

$$\text{Substituindo } \Delta t_{\text{RES}} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-16} \text{ erg/K}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

temos

$$Q_{\text{INJ. MAX}} \cong 9,7 \cdot 10^6 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

ou

$$Q_{\text{INJ. MAX}} = 7,3 \frac{\text{TORR} \cdot \ell}{\text{s}}$$

uma vez que

$$7,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{TORR} \cdot \ell}{\text{s}} = 1 \cdot \frac{\text{dyn} \cdot \text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

Agora, a relação entre $Q_{V.R.}$ e P_{RES} (CAP. IV) é dada por:

$$Q_{V.R.} = -0,8 + 0,0119 \cdot P_{\text{RES}}$$

Assim

$$P_{\text{RES. MAX}} \cong 681 \text{ TORR}$$

Para o cálculo de $P_{RES.MIN}$ procedemos da mesma forma, trocando apenas a condição (4) pela condição (3). Contudo, disparos tokamak na região delimitada no diagrama acima, indicaram a presença de partículas injetadas somente a partir de 100 TORR; porém, já em $P_{RES} = 200$ TORR a corrente de plasma morria prematuramente. Com isso, fixamos os valores de $t_{DISPARO}$ e P_{RES} a serem testados numa série de pulsos tokamak. Estes valores estão na Figura V.1.

Paralelamente fixamos os valores de NIV.DC, AMP e DUR. E como já havia acontecido na medida de t_{INCORP} , no Capítulo IV, o valor de NIV.DC = 23 V. Isto porque o cristal piezoelétrico apresentava histerese se submetido a tensões maiores que os 23 V. Então, para compensar em parte o efeito desse baixo valor de NIV.DC sobre o funcionamento da V.R., fixamos o valor da AMP = 180 V; ou seja: a máxima tensão que o circuito que aciona a válvula pode fornecer. Por sua vez, a duração do disparo da V.R.(DUR) foi fixada em 2,4 ms.

A série de pulsos tokamak destinada aos testes das condições de disparo da V.R., foi feita com uma corrente de 8 kA, por ser a de mais fácil ajuste e maior reprodutibilidade. Para aferir cada condição definida na Fig. V.1, medimos a densidade de plasma, com e sem a injeção de gás, a uma distância de 8 cm do centro do vaso. Observe-se ainda que a sonda eletrostática esteve submetida a tensão mais negativa que o gerador de rampa podia fornecer ($\cong -55$ V).

Para o cálculo da densidade de plasma na série de disparos acima, tomamos 22 eV como o valor da temperatura de elétrons na posição escolhida para medida ([DAL-82], pag.93).

A escolha das condições (P_{RES} , $t_{DISPARO}$, AMP, DUR, NIV.DC) que maximizam o acréscimo de densidade, foi feita atra

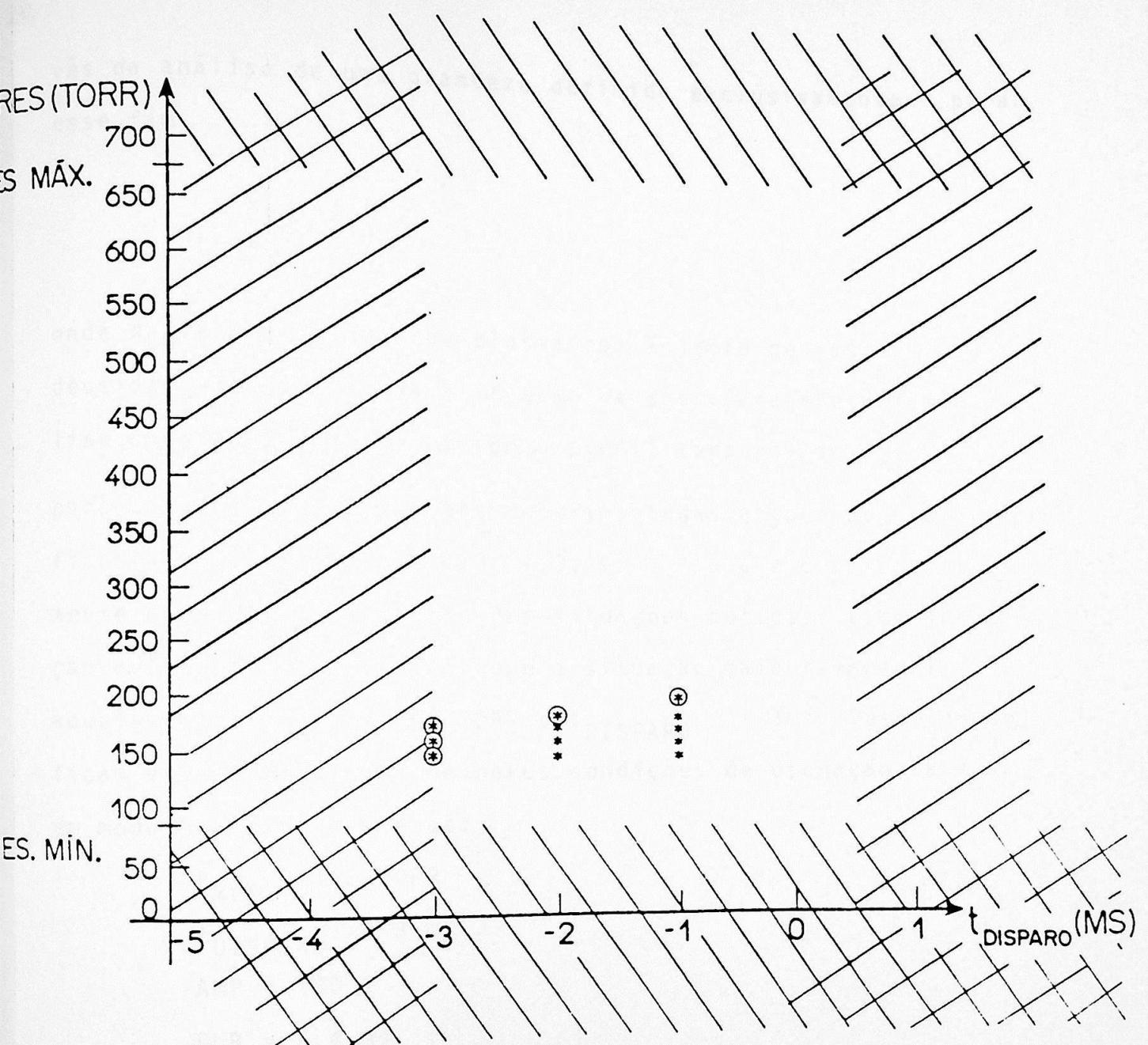


FIG.V.1 - DIAGRAMA INDICATIVO DAS CONDIÇÕES DE $t_{disparo}$ E P_{res} PARA OS TESTES EM MODO TOKAMAK QUE DETERMINAM AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA V.R. OS PONTOS ASSINALADOS COM UMA CIRCUNFERÊNCIA INDICAM AS MELHORES CONDIÇÕES PARA CADA P_{res} .

vés da análise de uma grandeza definida exclusivamente para esse fim

$$\left(\frac{N_{CG}}{N_{SG}} - 1\right)$$

onde N_{CG} é a densidade de plasma com injeção de gás e N_{SG} é a densidade de plasma sem a injeção de gás. Para efetuar a análise, construímos gráficos com o perfil temporal de $\left(\frac{N_{CG}}{N_{SG}} - 1\right)$ para cada uma das condições experimentadas. Alguns desses gráficos estão nas Figuras V.2, V.3, V.4, V.5 e V.6. Propositamente apresentamos as melhores situações obtidas; e da inspeção delas se pode concluir que a situação mais favorável é aquela em que $P_{RES} = 160$ TORR e $t_{DISPARO} = -3$ ms. Desse modo ficam estabelecidas as melhores condições de operação da V.R. em modo tokamak. São elas:

$$P_{RES} = 160 \text{ TORR}$$

$$t_{DISPARO} = -3 \text{ ms}$$

$$AMP = 180 \text{ V}$$

$$DUR = 2,4 \text{ ms}$$

$$NIV.DC = 23 \text{ V}$$

Note que as condições acima se encontram dentro do esperado, conforme discussão preliminar. Mas há dois pontos que chamam atenção. O $t_{DISPARO}$ indica que só há energia disponível para transformar o gás injetado em plasma no início da descarga. A baixa P_{RES} , se comparada com a $P_{RES.MAX}$ calculada, mostra que esta disponibilidade é pequena.

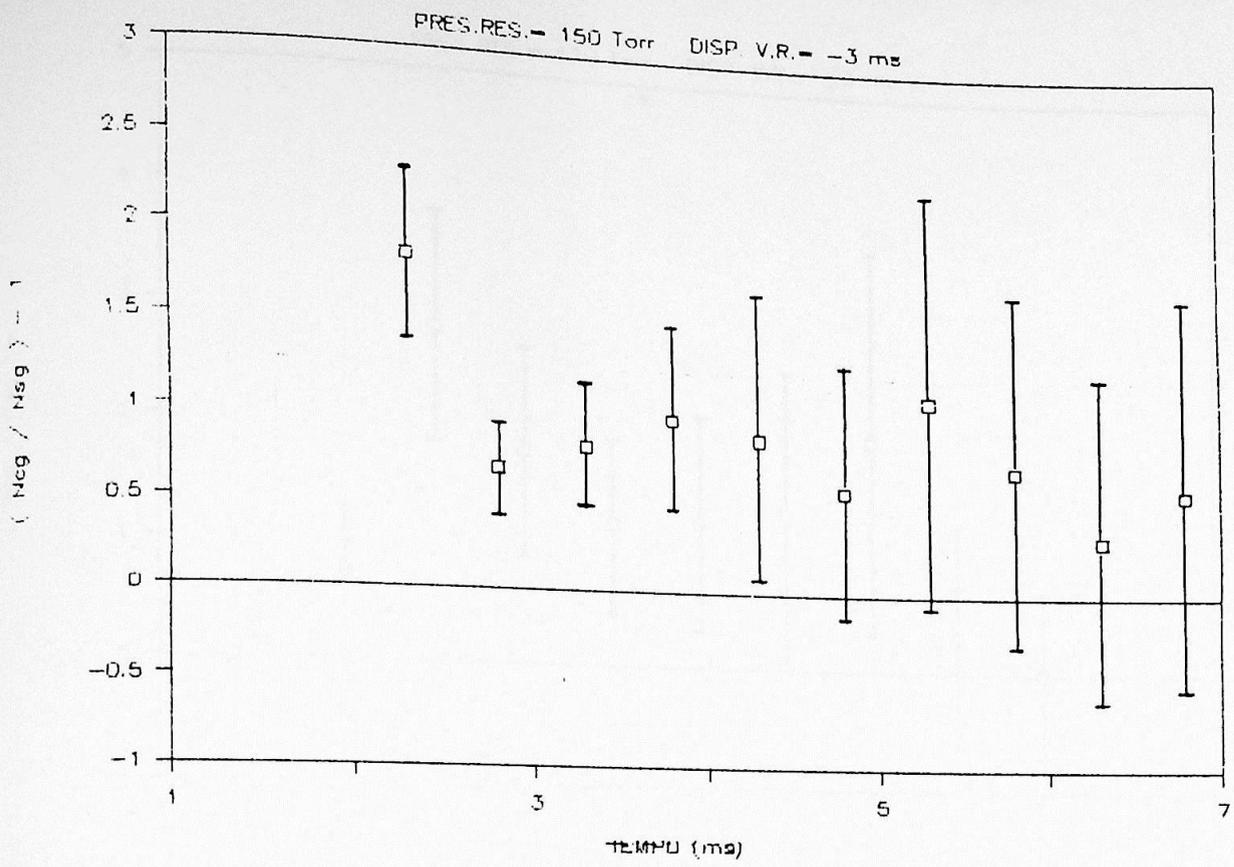


FIG.V.2 - PERFIL TEMPORAL DO ACRÉSCIMO DE DENSIDADE.

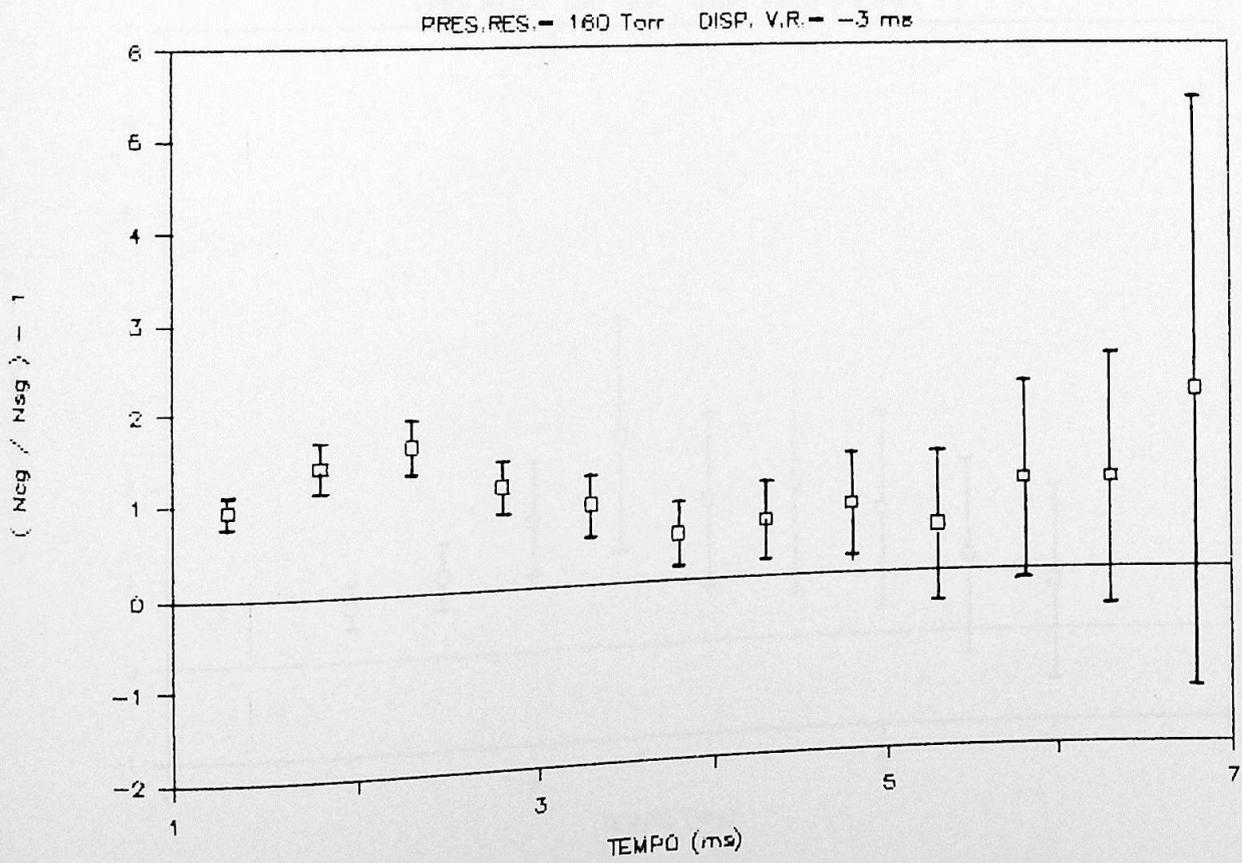


FIG.V.3 - PERFIL TEMPORAL DO ACRÉSCIMO DE DENSIDADE.

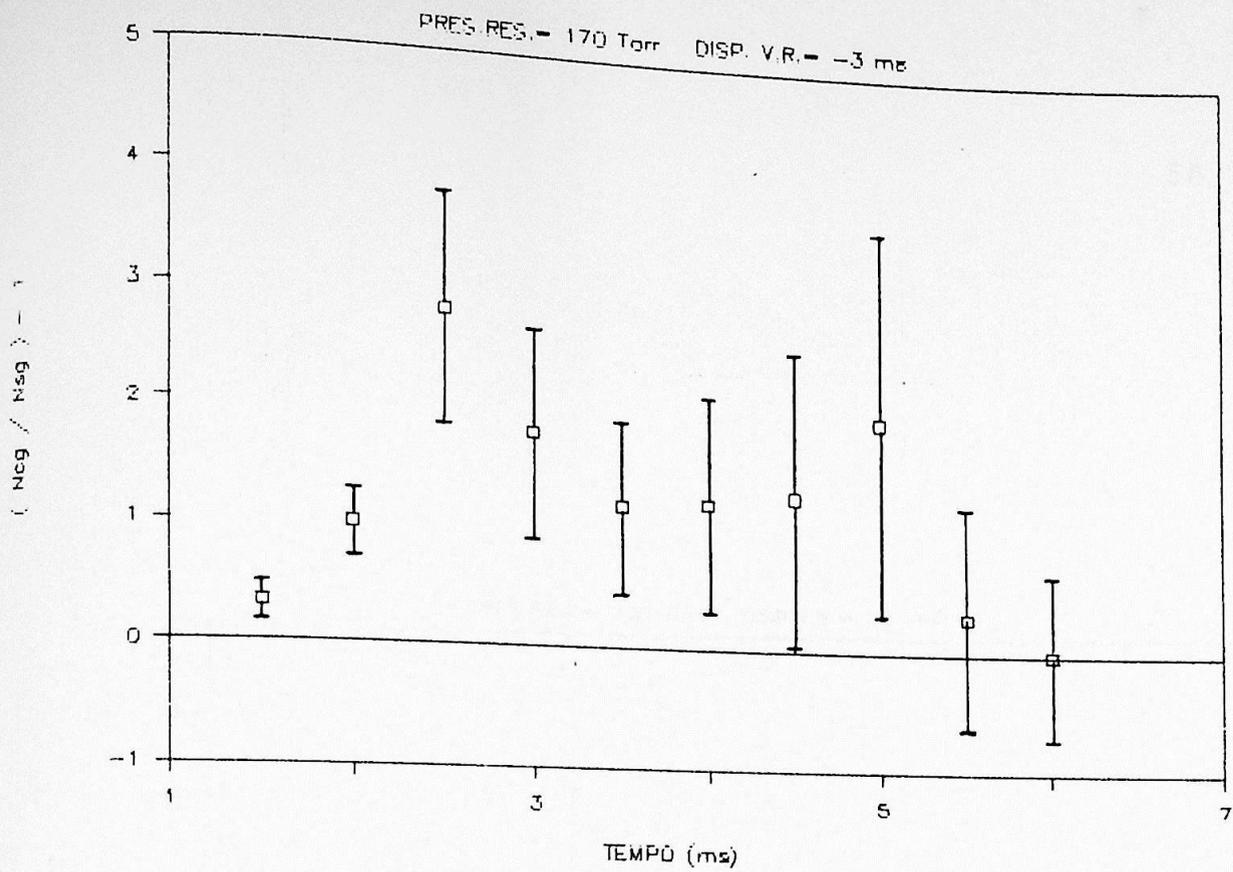


FIG.V.4 - PERFIL TEMPORAL DO ACRÉSCIMO DE DENSIDADE.

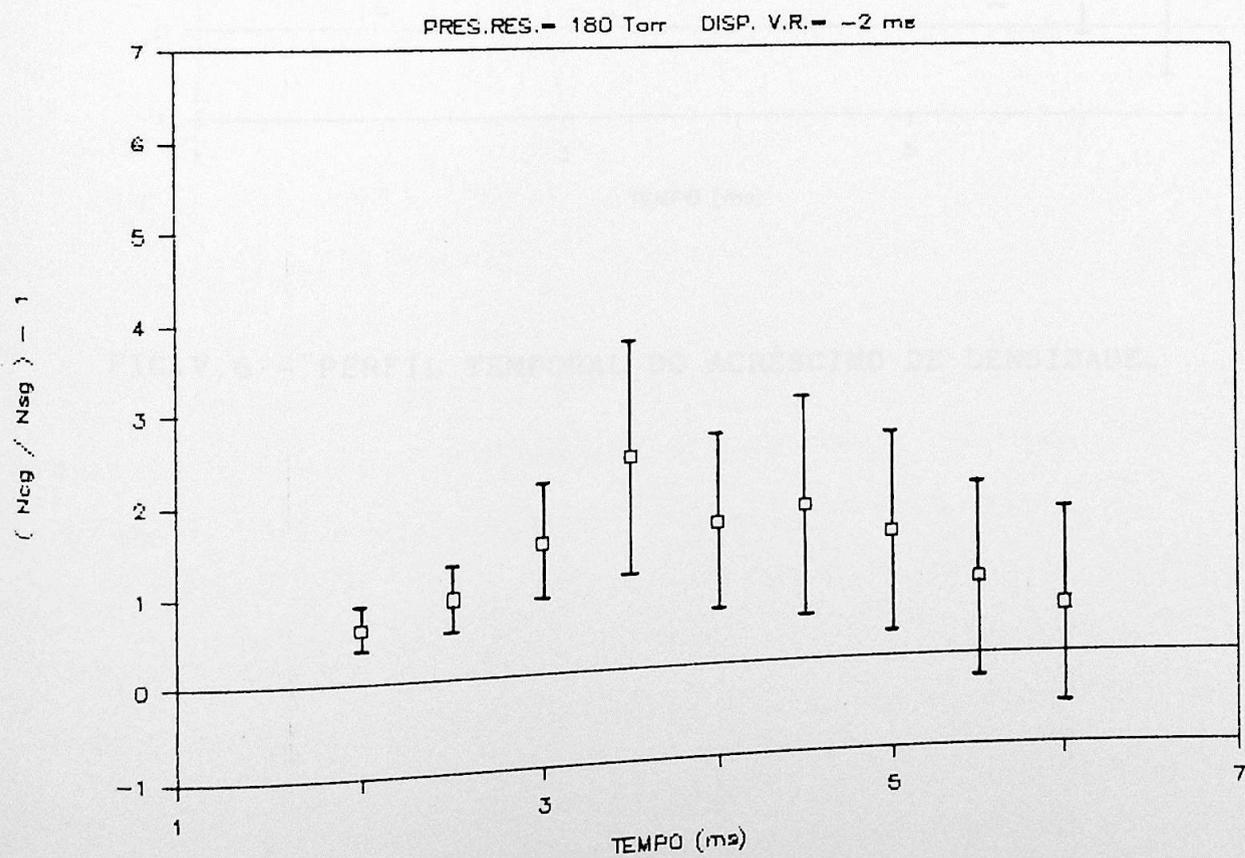


FIG.V.5 - PERFIL TEMPORAL DO ACRÉSCIMO DE DENSIDADE.

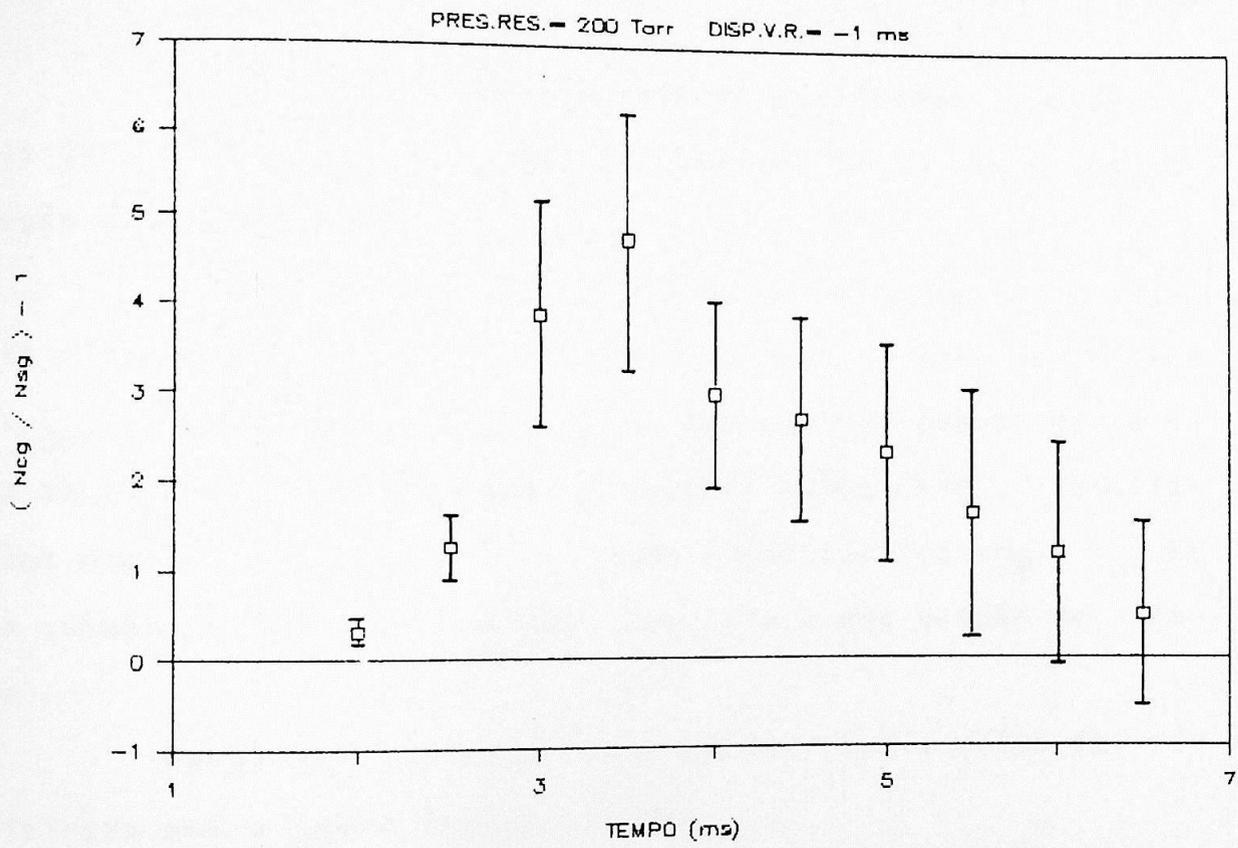


FIG.V.6 - PERFIL TEMPORAL DO ACRÉSCIMO DE DENSIDADE.

VI. RESULTADOS COM E SEM INJEÇÃO PULSADA DE GÁS

Neste capítulo descrevemos os resultados comparativos para a descarga de plasma no tokamak TBR-I, com e sem injeção pulsada de gás.

Trabalhamos com dois valores de corrente de plasma, 6KA e 8KA, registrando os seguintes sinais: tensão de enlace (V_{LOOP}), corrente de plasma (I_p), posição horizontal da coluna de plasma (P.H.), emissão de raios-X duros (R-X), oscilações magnéticas (osc. MHD) e sonda eletrostática (n_p e T_e). Esta submetida ora a uma tensão fixa, ora a uma tensão de rampa.

Para cada corrente, cada um dos sinais acima foi registrado com e sem a injeção de gás.

Para cada corrente também, procuramos manter a coluna de plasma centrada.

As quatro séries de medida em modo tokamak foram precedidas por períodos de limpeza por descarga (processo Taylor) com quatro horas de duração em média, a uma pressão $P_{LIM} \approx 9,6-12,0 \cdot 10^{-4}$ mbar. Já a pressão em qualquer uma das séries de medida era de $P_{TOK} \approx 2,9 \cdot 10^{-4}$ mbar. As condições específicas de limpeza e disparo em modo tokamak são apresentadas na Tabela VI.1. Nas Figuras VI.1, VI.2, VI.3 e VI.4 vemos sinais de V_{LOOP} , I_p , P.H., RX, n_p e T_e para cada uma das séries. As medidas de n_p e T_e foram feitas a 7,8 e 9 cm do centro do plasma. A cada 3 ou 4 pulsos tokamak perdíamos 1.

	PRIMEIRA SÉRIE DE DADOS	SEGUNDA SÉRIE DE DADOS	TERCEIRA SÉRIE DE DADOS	QUARTA SÉRIE DE DADOS
CONDIÇÕES DE LIMPEZA				
P _{bas.}	1,2.10 ⁻⁶ mbar (N ₂)	1,2.10 ⁻⁶ mbar (N ₂)	9,7.10 ⁻⁷ mbar (N ₂)	8,4.10 ⁻⁷ mbar (N ₂)
P _{lim.}	1,2.10 ⁻³ mbar (H ₂)			
t _{pulso}	54 ms	54 ms	55 ms	55 ms
ciclo de trabalho	4,6%	4,5%	4,7%	5%
t _{limp.}	3hs	5h25min	3hs	2hs
CONDIÇÕES TOKAMAK				
I _p	8 kA	8 kA	6 kA	6 kA
P _{tok}	2,9.10 ⁻⁴ mbar (H ₂)	2,9.10 ⁻⁴ mbar (H ₂)	3,1.10 ⁻⁴ mbar (H ₂)	2,9.10 ⁻⁴ mbar (H ₂)
V _{tor-r}	4,48 kV (-6,10ms)	4,50 kV (-6,10ms)	4,50 kV (-6,10ms)	4,50 kV (-6,10ms)
V _{tor-l}	265 V (-5,30ms)	270 V (-5,30ms)	265 V (-5,30ms)	265 V (-5,30ms)
V _{osc.}	5,60 kV (-1,45ms)	5,50 kV (-1,45ms)	5,60 kV (-1,44ms)	5,60 kV (-1,44ms)
V _{oht-r}	2,56 kV (0ms)	2,53 kV (0ms)	2,05 kV (0ms)	2,03 kV (0ms)
V _{oht-l}	320 V (0ms)	400 V (0ms)	290 V (0ms)	330 V (0ms)
V _{vert-r}	1,04 kV (0ms)	1,06 kV (0ms)	0,80 kV (0ms)	0,75 kV (0ms)
V _{vert-l}	81 V (0ms)	78 V (0ms)	80 V (0ms)	69 V (0ms)
CONDIÇÕES DA V.R.				
t _{disparo}	SEM INJEÇÃO DE GÁS			
Pres	160 Torr	160 Torr	160 Torr	160 Torr
DUR.	2,4 ms	2,4 ms	2,4 ms	2,4 ms
AMP.	175 V	175 V	175 V	175 V
NIV.DC	23,0 V	23,0 V	23,0 V	23,0 V

TAB.VI.1 - QUADRO INDICATIVO DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DAS QUATRO SÉRIES DE MEDIDA.

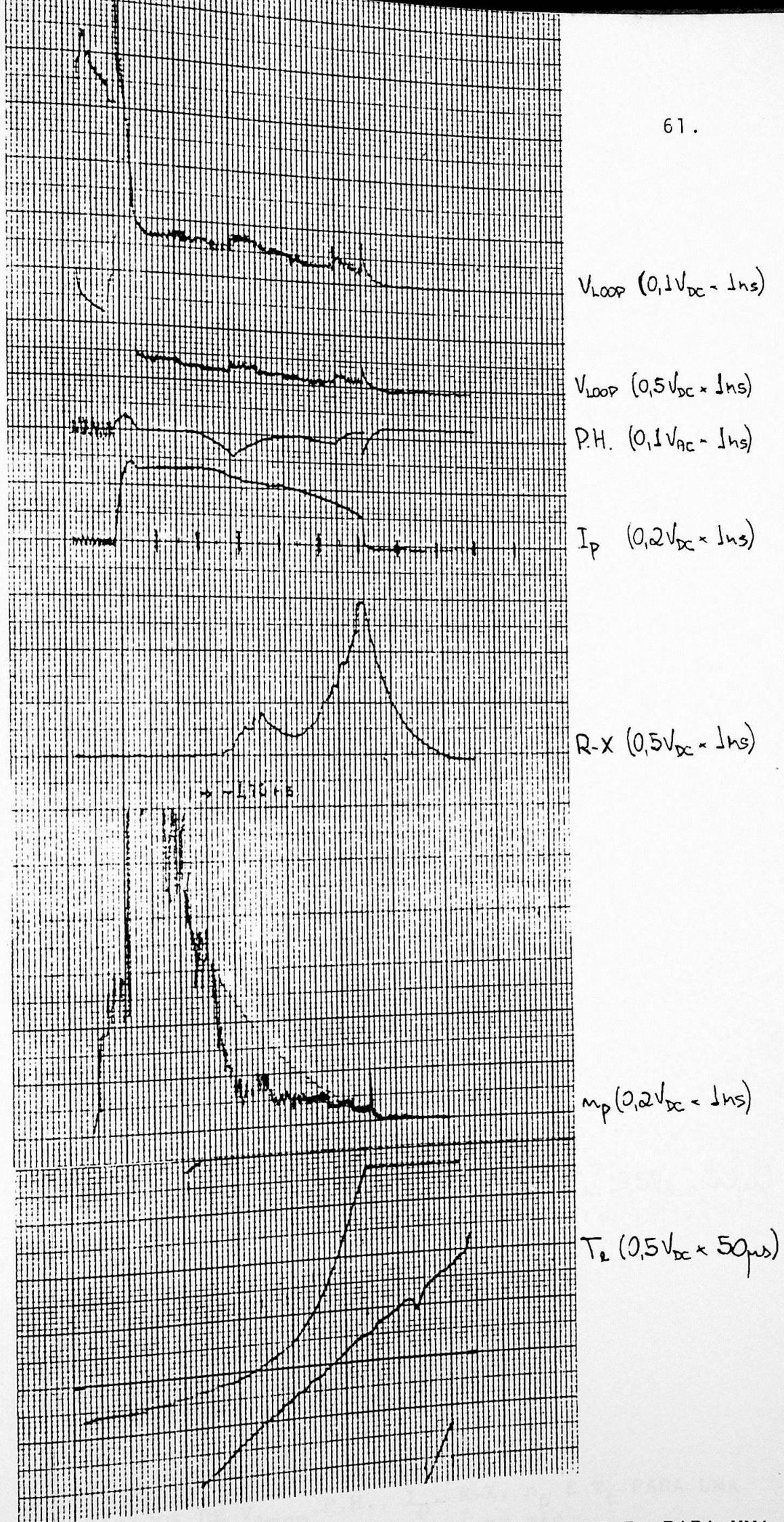
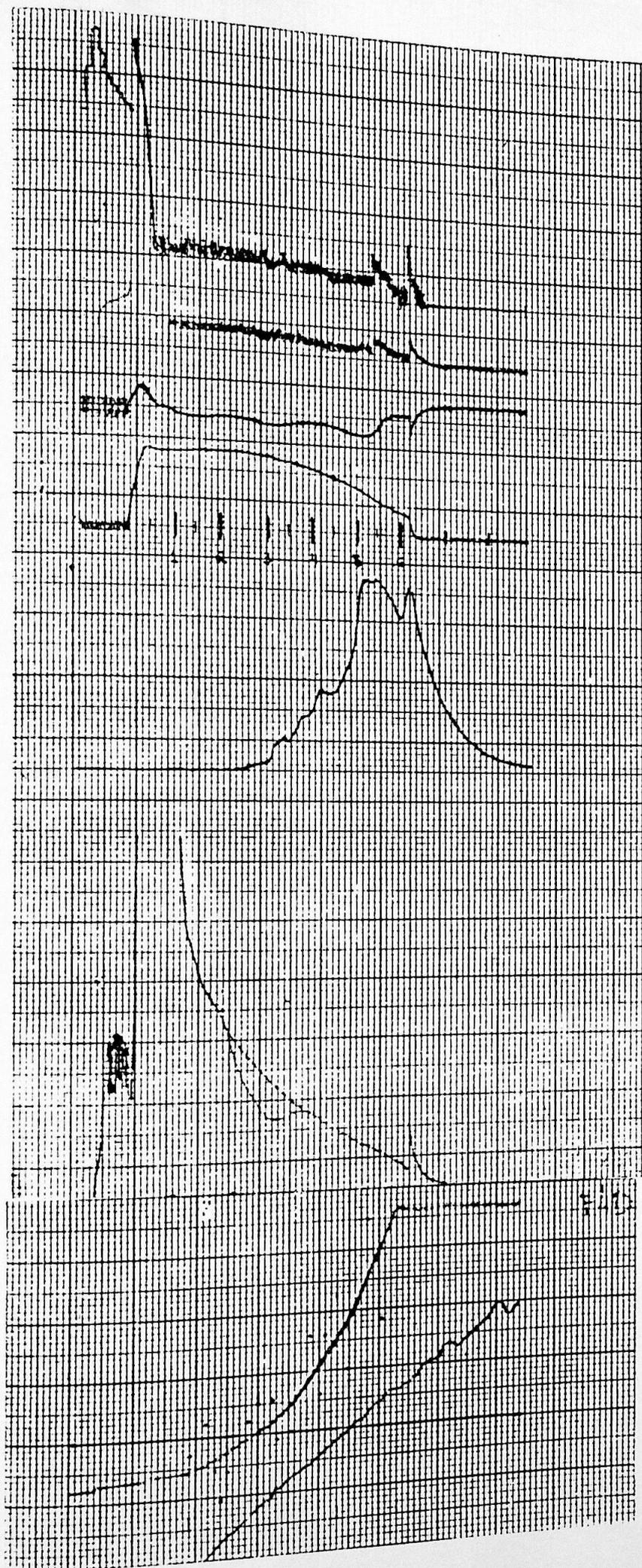
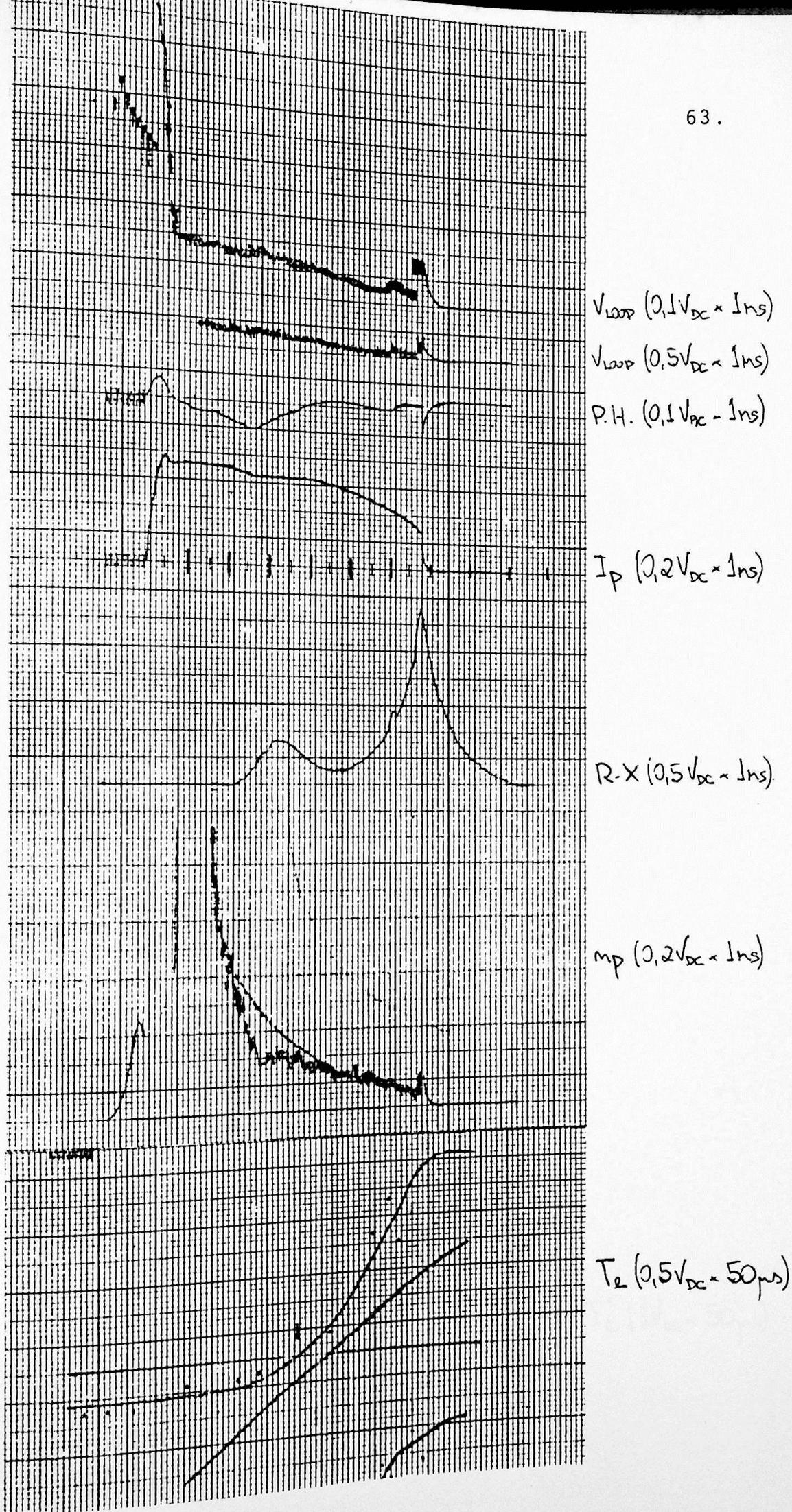
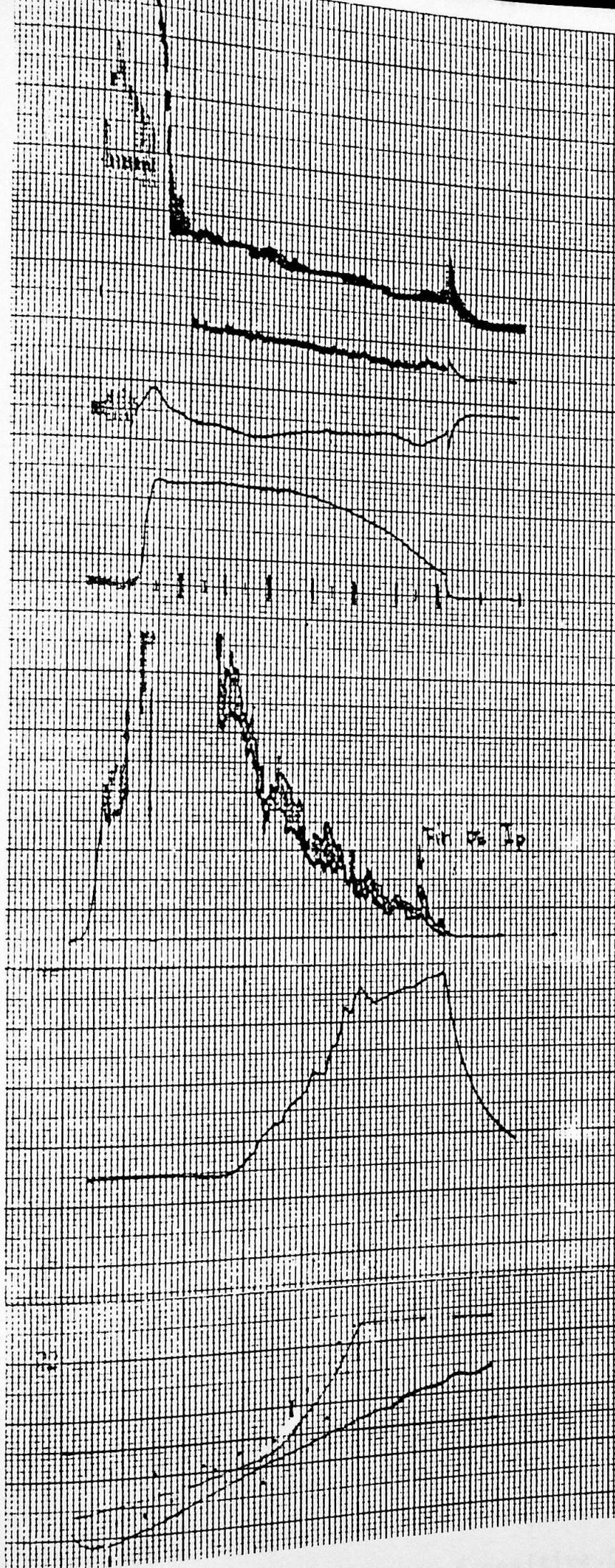


FIG. VI.1 - SINAIS TÍPICOS DE V_{loop} , P.H., I_p , R-X, n_p E T_e PARA UMA CORRENTE DE 6kA SEM INJEÇÃO PULSADA DE GÁS.


 $V_{loop} (0,1V_{DC} \times 1ms)$
 $V_{loop} (0,5V_{DC} \times 1ms)$
 $P.H. (0,1V_{AC} \times 1ms)$
 $I_p (0,2V_{DC} \times 1ms)$
 $R-X (0,5V_{DC} \times 1ms)$
 $n_p (0,2V_{DC} \times 1ms)$
 $T_e (0,5V_{DC} \times 50\mu s)$



IG. VI.3 - SINAIS TÍPICOS DE V_{loop} , P.H., I_p , R-X, n_p E T_e PARA UMA
 CORRENTE DE 8kA SEM INJEÇÃO PULSADA DE GÁS.


 $V_{loop} (0,1V_{DC} = 1ns)$
 $V_{loop} (0,5V_{DC} = 1ns)$
 $P.H. (0,1V_{DC} = 1ns)$
 $I_p (0,2V_{DC} = 1ns)$
 $m_p (0,2V_{DC} = 1ns)$
 $R-x (0,5V_{DC} = 1ns)$
 $T_e (1V_{DC} = 50ps)$

VI.4 - SINAIS TÍPICOS DE V_{loop} , P.H., I_p , R.X., n_p E T_e PARA UMA CORRENTE DE 8kA COM INJEÇÃO PULSADA DE GÁS.

Na seleção do sinal de n_p era usado um filtro passivo passa baixa com $RC = 3 \cdot 10^{-6}$ s, para eliminar as oscilações inerentes ao sinal, mas sem alterar o perfil de decaimento temporal, que devia ser aproximadamente exponencial. A sonda eletrostática neste caso era submetida a uma tensão fixa negativa de $\approx -55V$. No caso de T_e , com a sonda submetida a uma tensão de rampa, registrávamos os sinais a intervalos de aproximadamente 1 ms, usando também o filtro RC acima para minimizar as oscilações naturais do sinal.

A aquisição de todos os dados, por sua vez, se deu através de fotografias dos sinais na tela do osciloscópio e posterior transposição delas para papel milimetrado. Os sinais de V_{LOOP} , I_p , P.H. e RX foram transpostos "ipsis-litteris", uma vez que suas variações eram todas significativas. Já os sinais de n_p e T_e apresentavam oscilações que não nos interessavam e por isto foram traçadas curvas médias que procuravam manter-se eqüidistantes dos extremos das oscilações em cada ponto.

A leitura das amplitudes dos sinais de n_p e T_e foi feita considerando-se este ajuste, de tal modo que a incerteza em cada ponto, correspondia à amplitude da oscilação local dividida por dois.

O cálculo de um determinado valor de T_e se faz a partir de uma tabela como a Tabela VI.2. Inicialmente se deve construir a curva característica, montando um gráfico da corrente coletada pela sonda (I_s) contra a tensão aplicada sobre ela (V_r). Em seguida deve-se purgar a região de corrente de elétrons da corrente de íons. Isto se faz somando a corrente de saturação de íons à curva toda, o que aumenta a região da curva onde a corrente coletada é positiva. O início dessa região coincide com o início da região de crescimento

T&S673

	AMPLITUDE DO SINAL DA RAMPA		SINAL DA RAMPA		AMPLITUDE DO SINAL DA SONDA		SINAL DA SONDA		CORRENTE NA SONDA	
	Ar (mm)		Vr (V)		As (mm)		Vs (V)		Is (A)	
1	-21.5	0.5	-56.4	1.3	-3.0	1.0	-0.20	0.07	-0.0020	0.0007
2	-20.5	0.5	-53.8	1.3	-3.0	1.0	-0.20	0.07	-0.0020	0.0007
3	-19.5	0.5	-51.2	1.3	-3.0	1.0	-0.20	0.07	-0.0020	0.0007
4	-19.0	0.5	-49.9	1.3	-3.0	1.0	-0.20	0.07	-0.0020	0.0007
5	-18.0	0.5	-47.3	1.3	-2.5	1.0	-0.17	0.07	-0.0017	0.0007
6	-17.5	0.5	-45.9	1.3	-2.5	1.0	-0.17	0.07	-0.0017	0.0007
7	-16.5	0.5	-43.3	1.3	-2.5	1.0	-0.17	0.07	-0.0017	0.0007
8	-15.5	0.5	-40.7	1.3	-2.5	1.0	-0.17	0.07	-0.0017	0.0007
9	-14.5	0.5	-38.1	1.3	-2.0	1.0	-0.13	0.07	-0.0013	0.0007
10	-13.5	0.5	-35.4	1.3	-2.0	1.0	-0.13	0.07	-0.0013	0.0007
11	-12.5	0.5	-32.8	1.3	-1.5	1.0	-0.10	0.07	-0.0010	0.0007
12	-12.0	0.5	-31.5	1.3	-1.5	1.0	-0.10	0.07	-0.0010	0.0007
13	-11.5	0.5	-30.2	1.3	-1.0	1.0	-0.07	0.07	-0.0007	0.0007
14	-10.0	0.5	-26.3	1.3	-1.0	1.0	-0.07	0.07	-0.0007	0.0007
15	-9.5	0.5	-24.9	1.3	-0.5	1.0	-0.03	0.07	-0.0003	0.0007
16	-8.5	0.5	-22.3	1.3	-0.5	1.0	-0.03	0.07	-0.0003	0.0007
17	-7.5	0.5	-19.7	1.3	0.0	1.0	0.00	0.07	0.0000	0.0007
18	-7.0	0.5	-18.4	1.3	0.5	2.5	0.03	0.17	0.0003	0.0017
19	-6.0	0.5	-15.8	1.3	0.5	2.5	0.03	0.17	0.0003	0.0017
20	-5.5	0.5	-14.4	1.3	1.0	2.5	0.07	0.17	0.0007	0.0017
21	-4.5	0.5	-11.8	1.3	1.5	2.5	0.10	0.17	0.0010	0.0017
22	-4.0	0.5	-10.5	1.3	1.5	2.5	0.10	0.17	0.0010	0.0017
23	-3.5	0.5	-9.2	1.3	2.0	2.5	0.13	0.17	0.0013	0.0017
24	-2.5	0.5	-6.6	1.3	2.5	2.5	0.17	0.17	0.0017	0.0017
25	-1.5	0.5	-3.9	1.3	3.5	2.5	0.23	0.17	0.0023	0.0017
26	-1.0	0.5	-2.6	1.3	4.5	2.5	0.30	0.17	0.0030	0.0017
27	0.0	0.5	0.0	1.3	5.5	2.5	0.36	0.17	0.0036	0.0017
28	1.0	0.5	2.6	1.3	7.0	2.5	0.46	0.17	0.0046	0.0017
29	1.5	0.5	3.9	1.3	9.0	2.5	0.59	0.17	0.0059	0.0017
30	2.5	0.5	6.6	1.3	11.0	2.5	0.73	0.17	0.0073	0.0017
31	3.0	0.5	7.9	1.3	13.0	2.5	0.86	0.17	0.0086	0.0017
32	4.0	0.5	10.5	1.3	15.5	2.5	1.02	0.17	0.0102	0.0017
33	5.0	0.5	13.1	1.3	17.5	2.5	1.16	0.17	0.0116	0.0017
34	5.5	0.5	14.4	1.3	19.0	2.5	1.25	0.17	0.0125	0.0017
35	6.5	0.5	17.1	1.3	21.5	2.5	1.42	0.17	0.0142	0.0017
36	7.0	0.5	18.4	1.3	23.0	2.5	1.52	0.17	0.0152	0.0017
37	8.0	0.5	21.0	1.3	24.5	2.5	1.62	0.17	0.0162	0.0017
38	9.0	0.5	23.6	1.3	26.5	2.5	1.75	0.17	0.0175	0.0017
39	10.0	0.5	26.3	1.3	28.0	2.5	1.85	0.17	0.0185	0.0017

TAB.VI.2 - TABELA DE CONVERSÃO DAS AMPLITUDES DOS SINAIS DIRETOS EM TENSÃO NA RAMPA (V_r) E CORRENTE NA SONDA (I_s).

exponencial da corrente. Essa região quando logaritmada e submetida a um ajuste numérico, permite calcular a T_e através do coeficiente angular da reta ajustada. A soma da corrente de íons à curva, a logaritmização da região exponencial e o ajuste numérico de uma reta à região logaritimada foram feitos dentro do programa AJUSTE no PDP-11. Nas Figuras VI.5 e VI.6 temos perfis temporais de T_e para cada corrente, nas situações com e sem gás. Nas Figuras VI.7 e VI.8 temos os perfis radiais da T_e .

Para o cálculo de n_p optamos pelo método de Laframboise. Os valores de T_e necessários para o cálculo de n_p foram tomados ponto a ponto, isto é, levando em conta a posição e o instante da medida. Nas Figuras VI.9 e VI.10 temos os perfis temporais de n_p e nas Figuras VI.11 e VI.12 os perfis radiais. Todos para as duas correntes e com e sem gás.

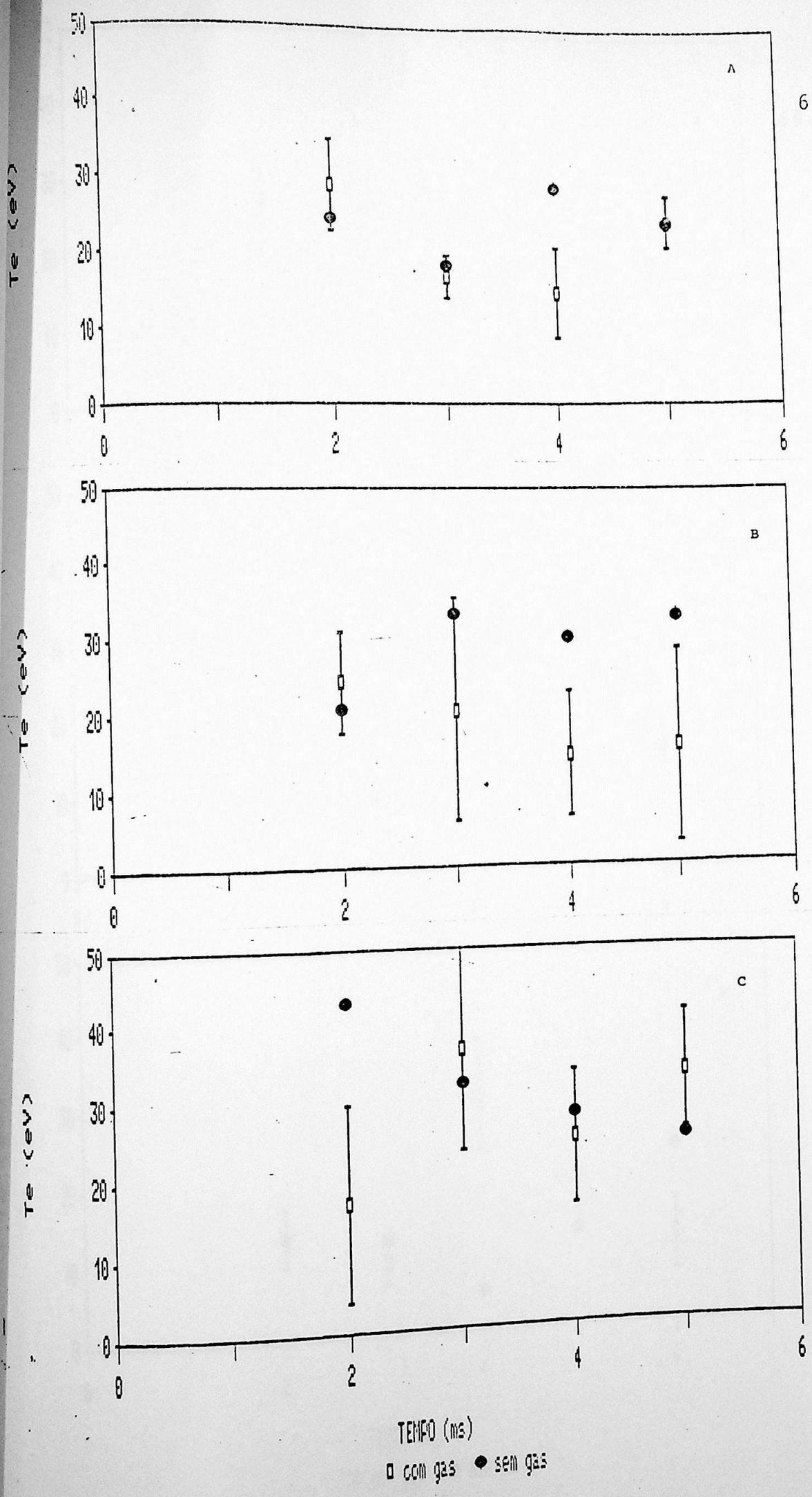
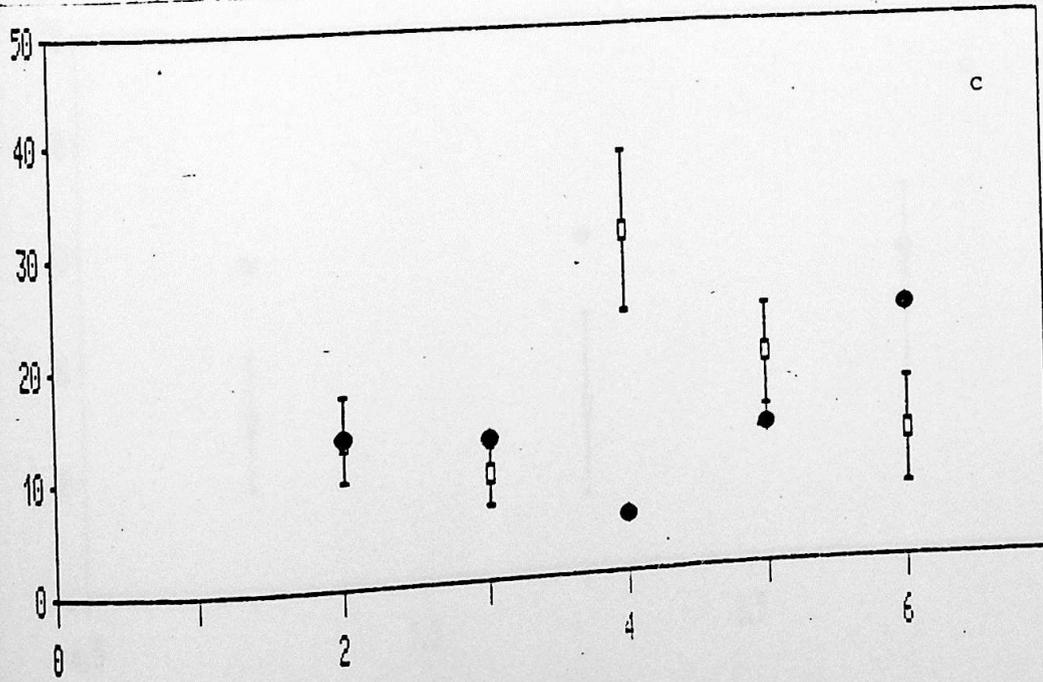
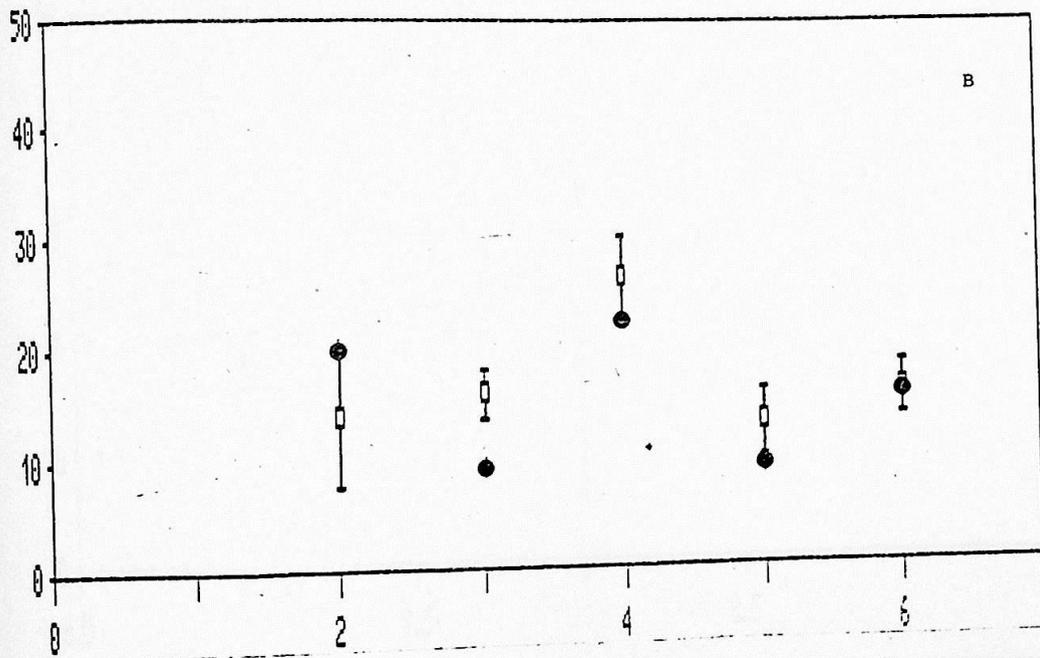
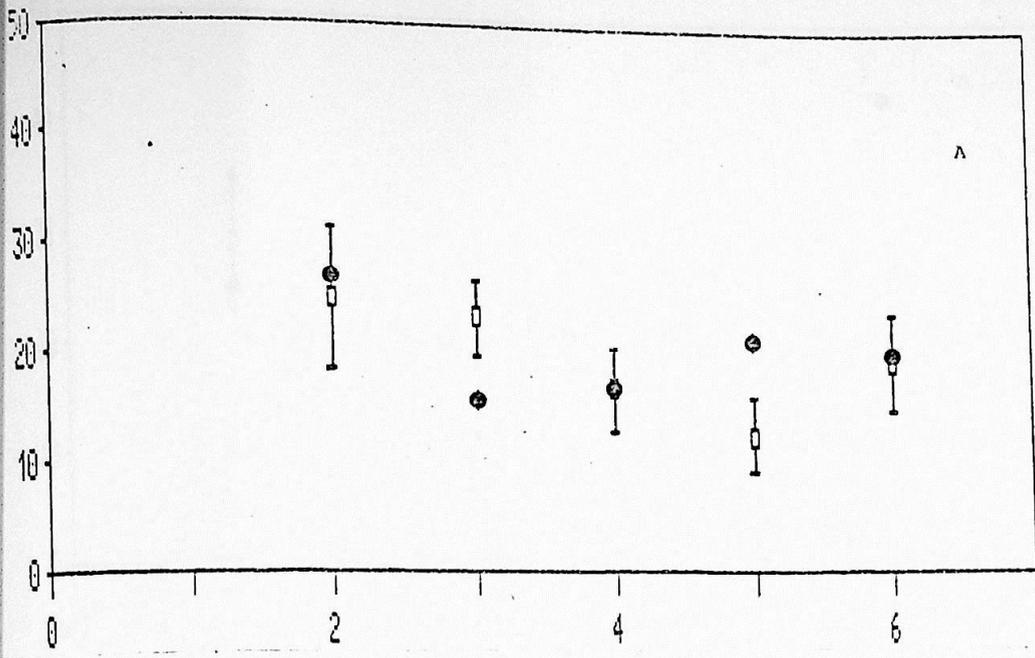


FIG. VI.5 - PERFIS TEMPORAIS DE T_e PARA 6kA.

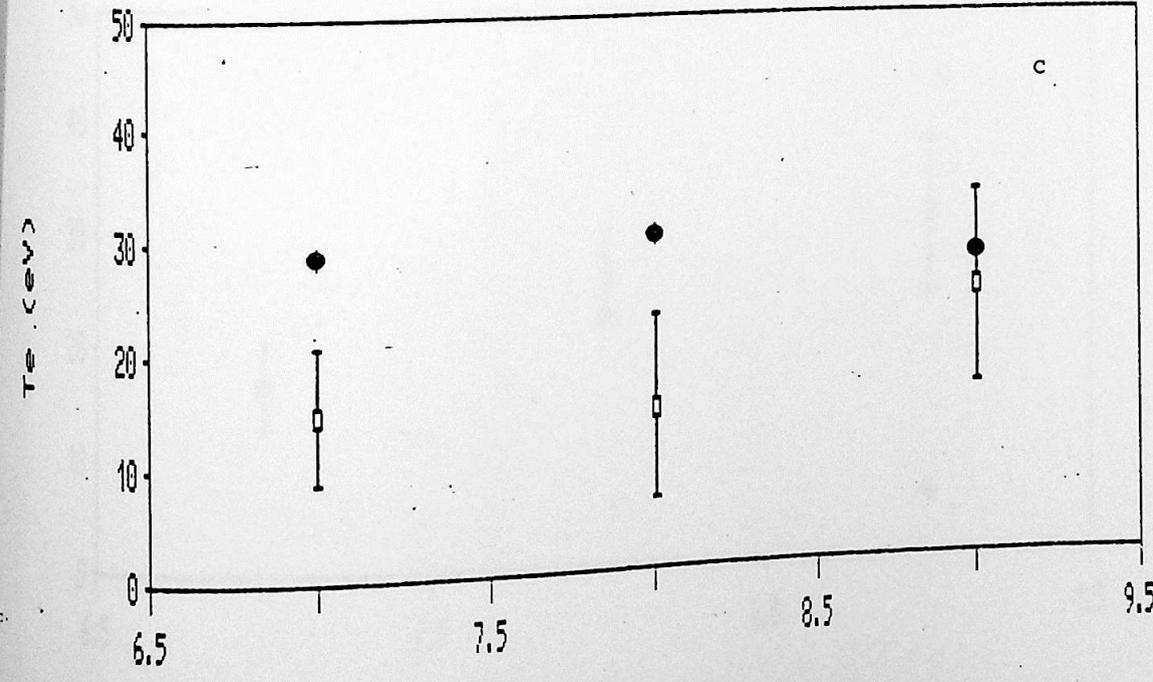
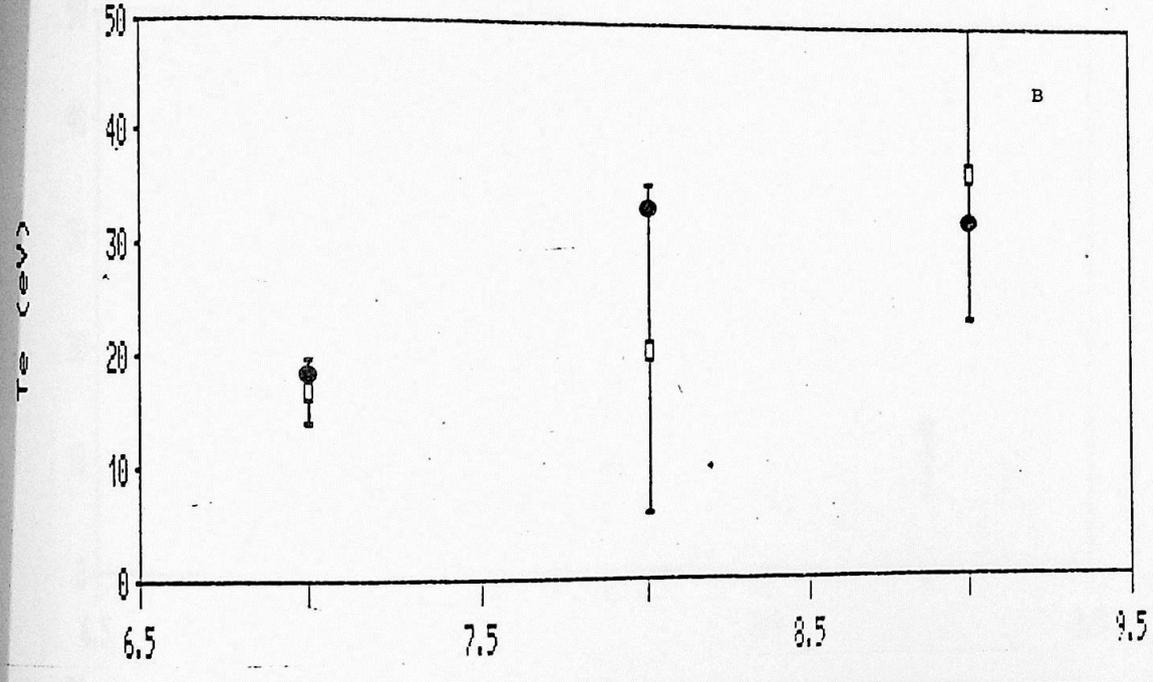
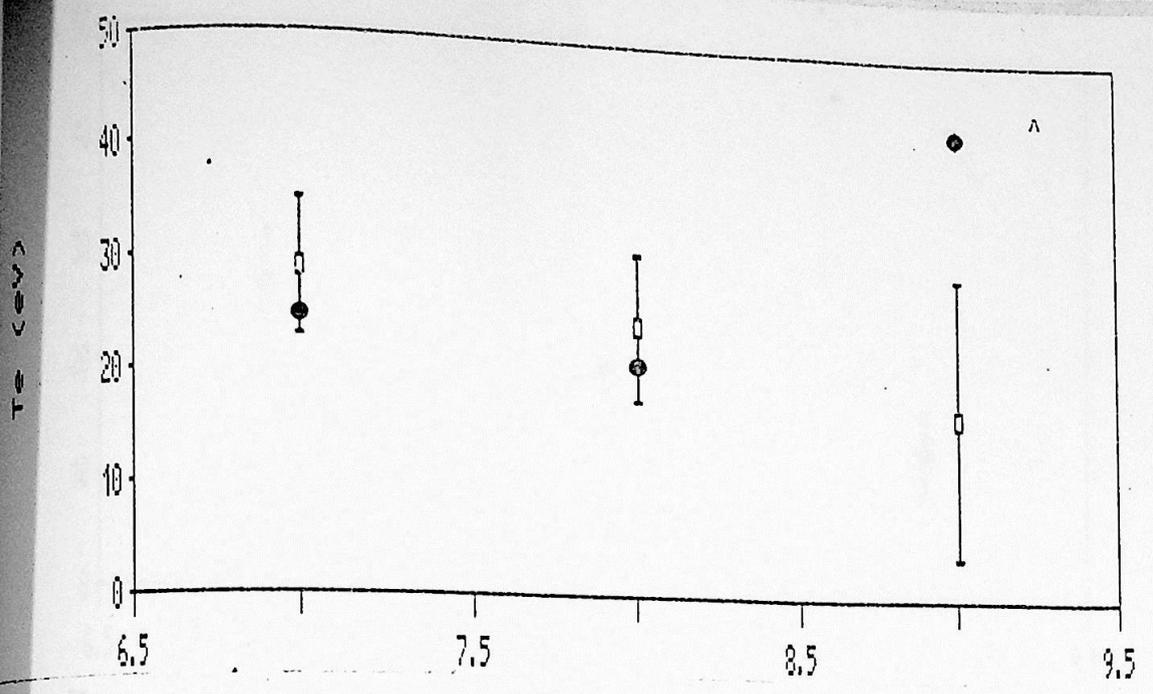
- a) a 7 cm
- b) a 8 cm
- c) a 9 cm



TEMPO (ns)
 □ COM Q35 ● SEM Q35

FIG. VI.6 - PERFIS TEMPORAIS DE T_e PARA SKA.

- a) a 7 cm
- b) a 8 cm
- c) a 9 cm



POSICAO DA SONDA (cm)
□ com gas ● sem gas

FIG. VI.7 - PERFIS RADIAIS DE T_e PARA 6kA.
a) a 2 ms
b) a 3 ms
c) a 4 ms

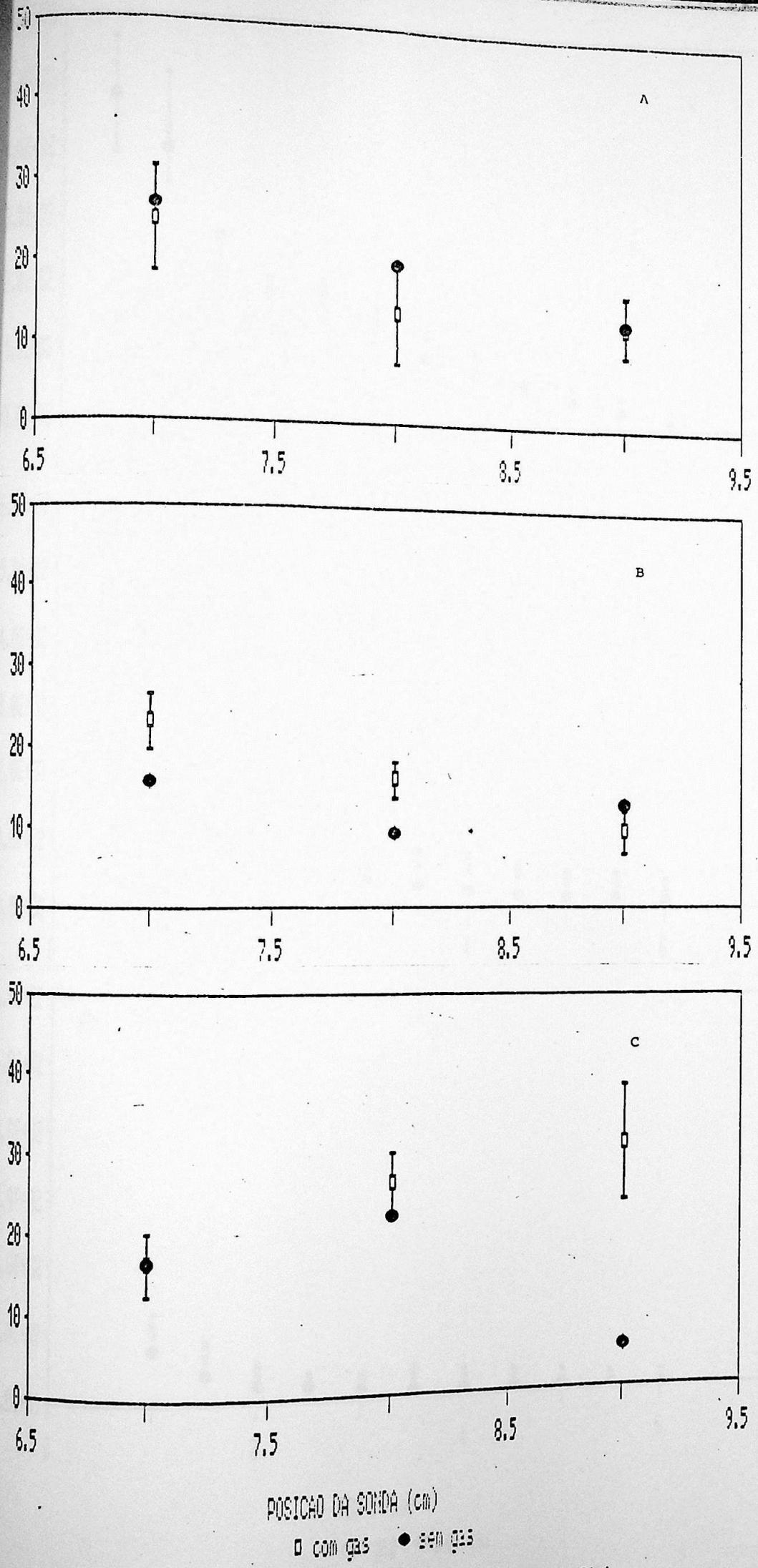
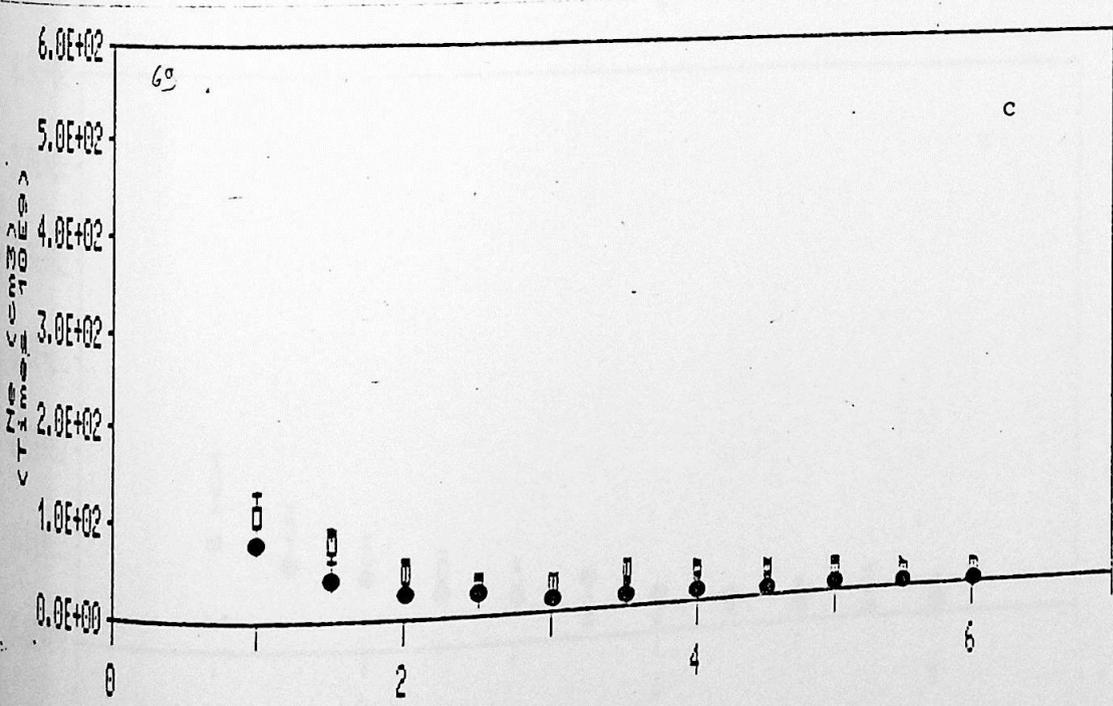
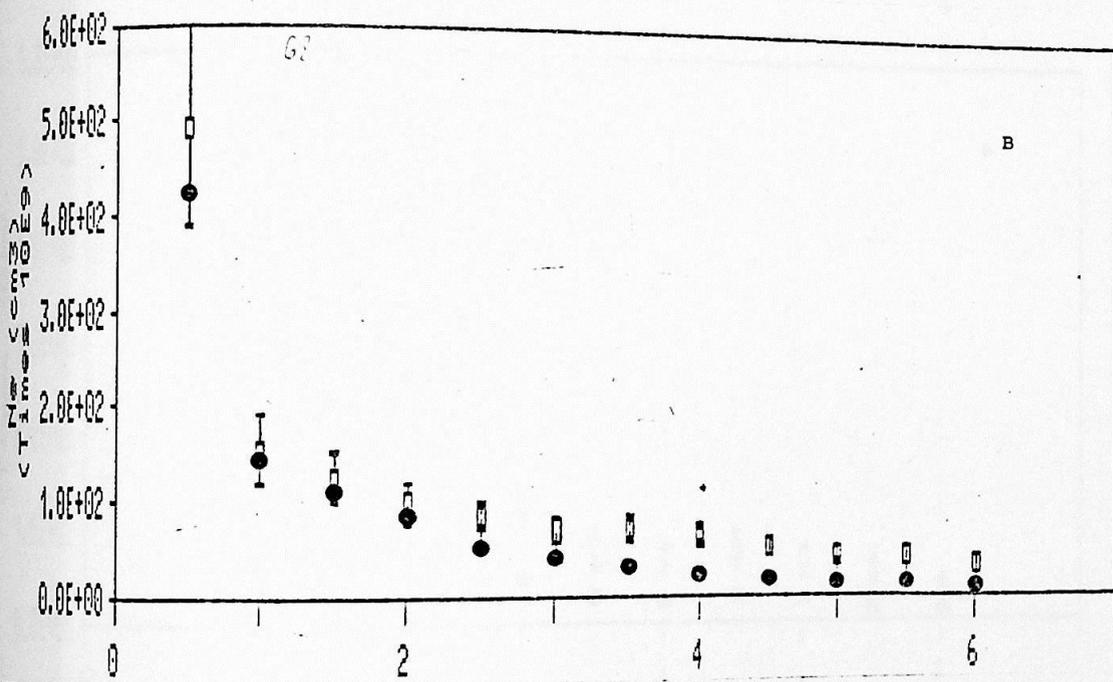
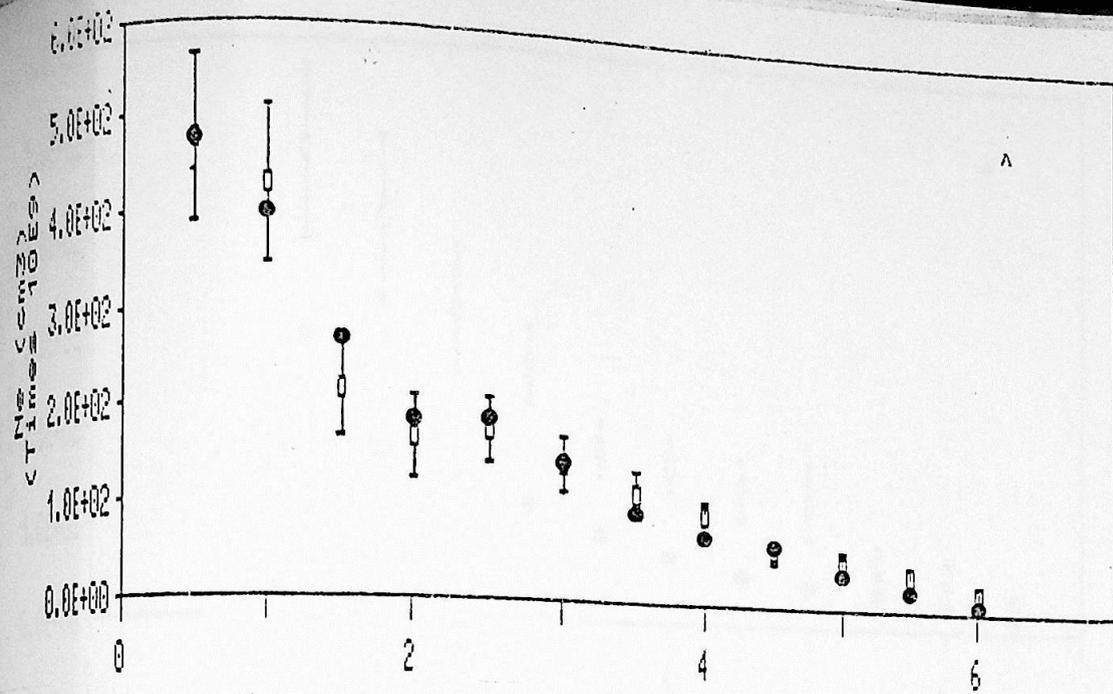


FIG. VI.8 - PERFIS RADIAIS DE T_e PARA 8kA.

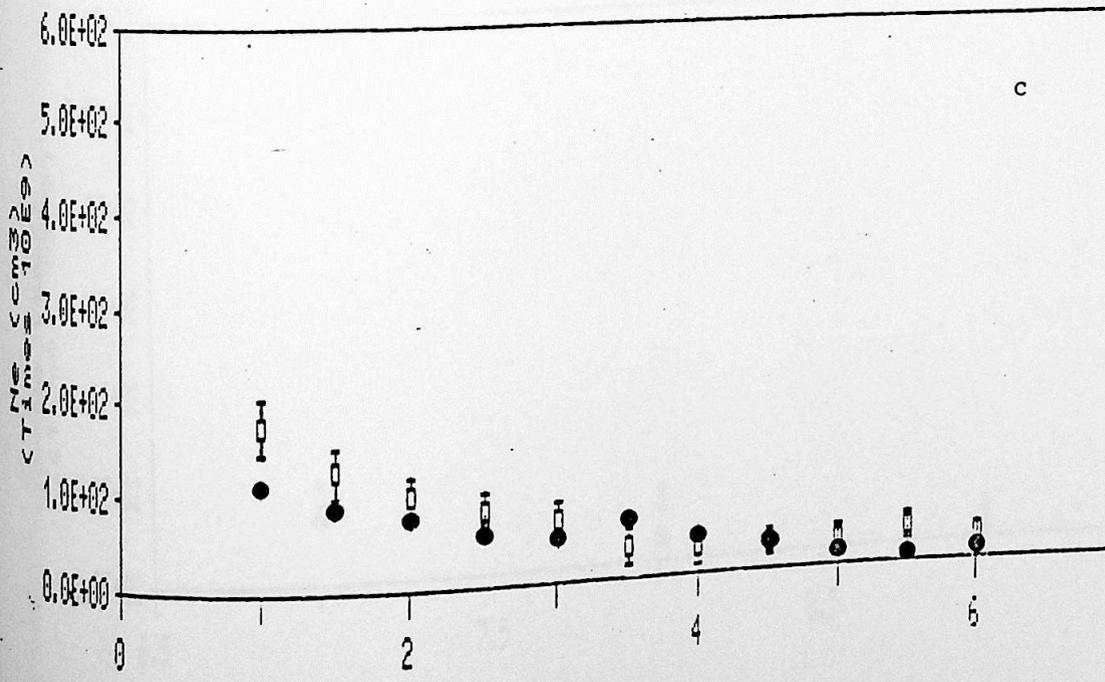
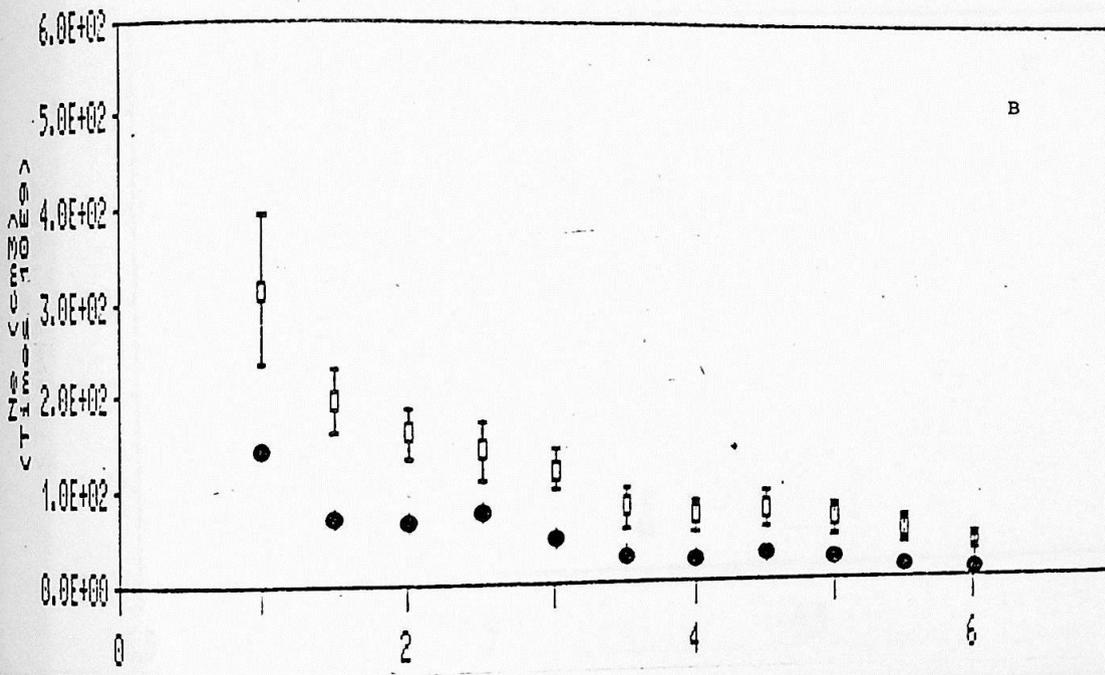
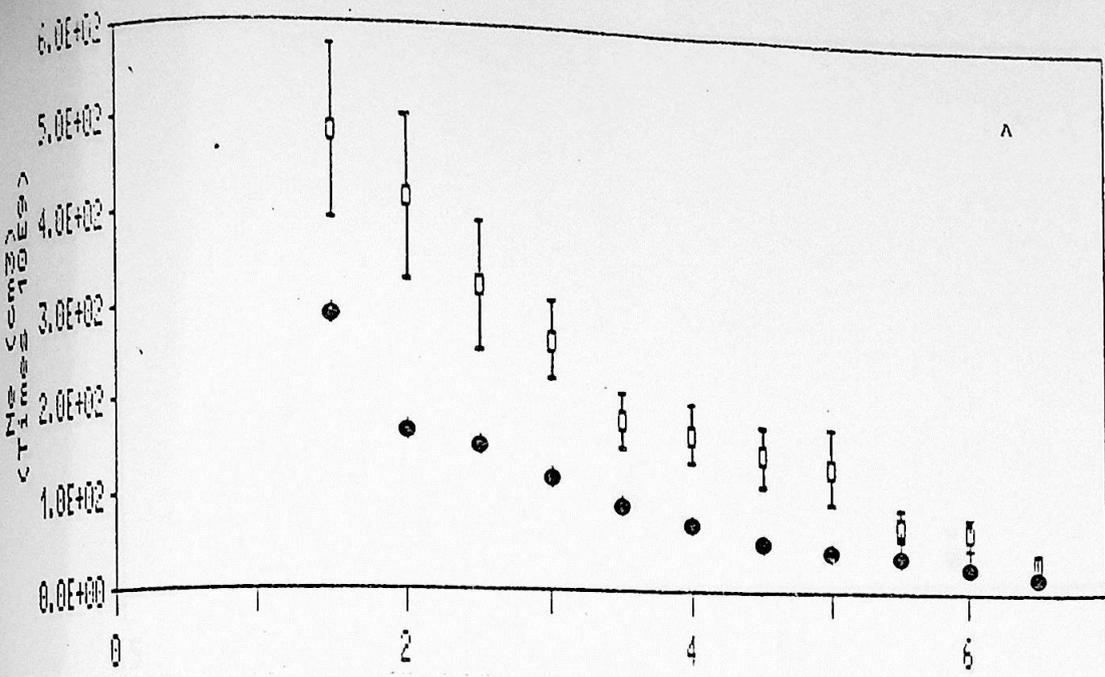
- a) a 2 ms
- b) a 3 ms
- c) a 4 ms



TEMPO (ns)
 □ COM Q33 ● SEM Q33

FIG. VI.9 - PERFIS TEMPORAIS DE n_p PARA 6kA.

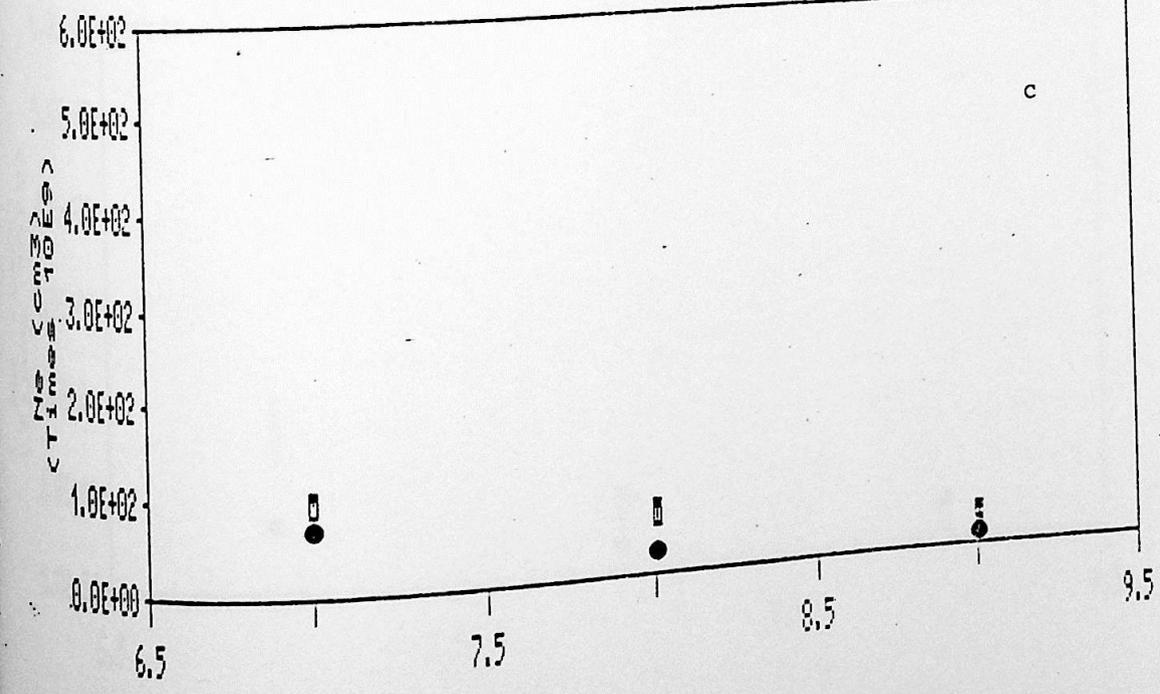
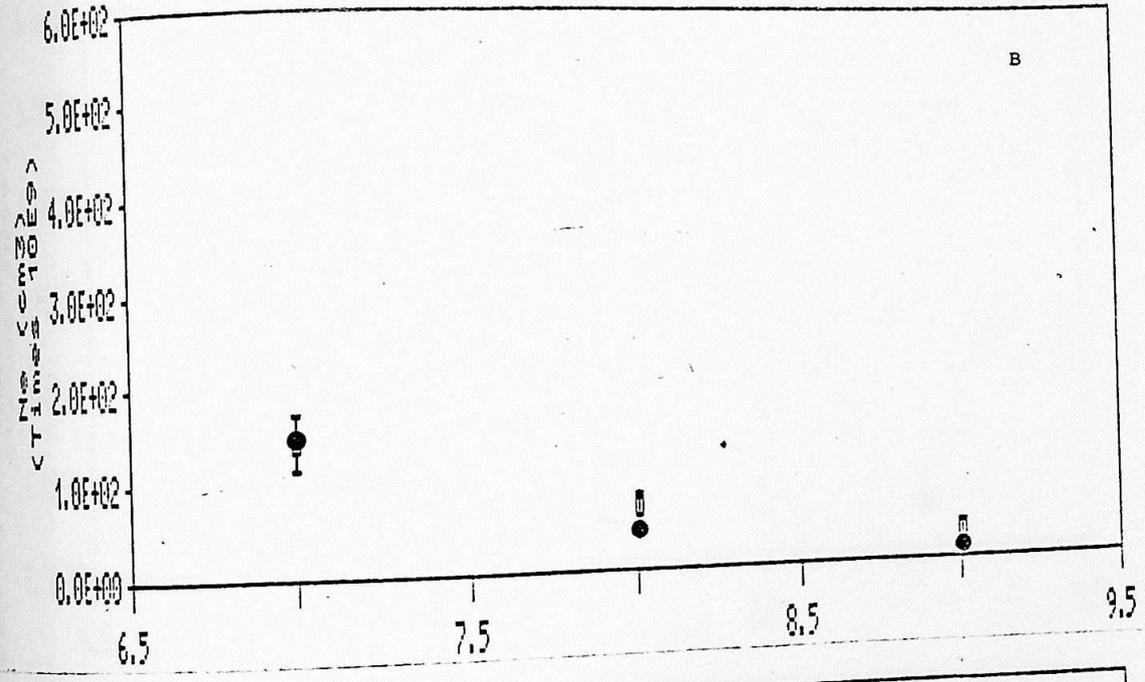
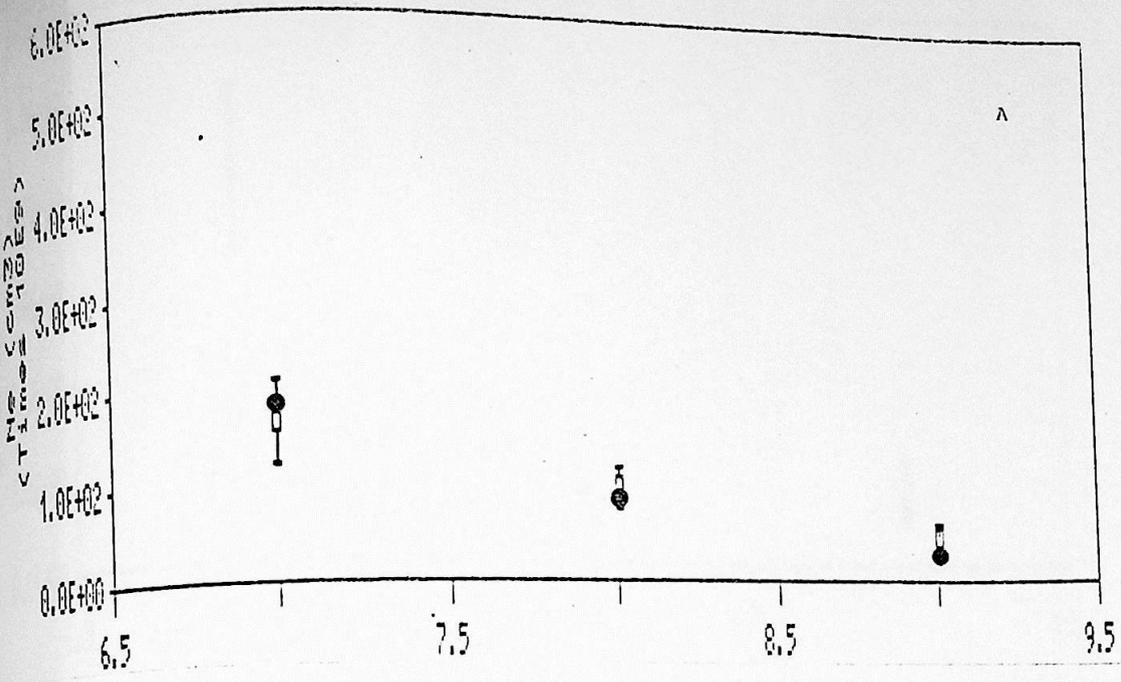
- a) a 7 cm
- b) a 8 cm
- c) a 9 cm



TEMPO (ms)
 □ SEM 923 ● SEM 923

FIG. VI.10 - PERFIS TEMPORAIS DE n_p PARA 8KA.

- a) a 7 cm
- b) a 8 cm
- c) a 9 cm



POSICAO DA BOMBA (cm)

□ COM GAS ● SEM GAS

FIG. VI.11 - PERFIS RADIAIS DE n_p PARA 6kA.

- a) a 2 ms
- b) a 3 ms
- c) a 4 ms

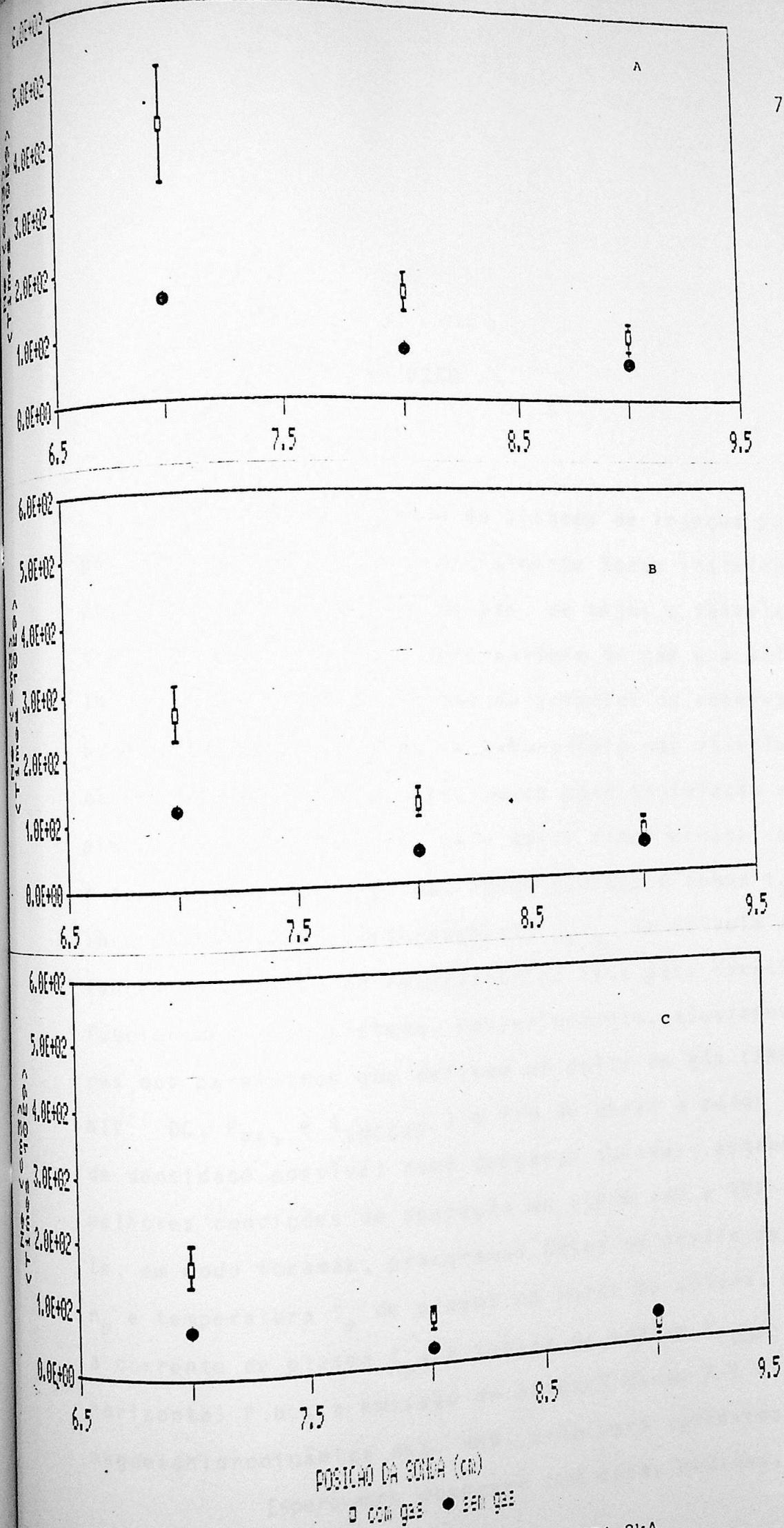


FIG.VI.12 - PERFIS RADIAIS DE n_p PARA 8kA.
 a) a 2 ms
 b) a 3 ms
 c) a 4 ms

VII. CONCLUSÃO

A implantação do sistema de injeção pulsada de gás teve várias etapas. Inicialmente foram instalados os dispositivos para a injeção de gás, ou seja: a válvula piezoelétrica de ação rápida, o reservatório de gás e a válvula agulha para controle da pressão no interior do reservatório. Embora tenhamos construído no Laboratório uma válvula eletromecânica de ação rápida, escolhemos para instalação uma válvula piezoelétrica comercial, pela maior simplicidade operacional e compacidade. Em seguida, foram medidos o tempo t_{INCRP} de incorporação do gás e (throughput) $Q_{V.R.}$ da válvula rápida em função da pressão no reservatório; isto para caracterizar o funcionamento do sistema. Posteriormente, ajustamos os valores dos parâmetros que definem um pulso de gás (AMP, DUR, NIV. DC, P_{RES} e t_{INCRP} .) a fim de obter o maior acréscimo de densidade possível numa descarga tokamak, estabelecendo as melhores condições de operação do SIPUG com o TBR-I. Finalmente, em modo tokamak, procuramos obter os perfis de densidade n_p e temperatura T_e de plasma na borda da coluna, monitorando a corrente de plasma I_p , a tensão de enlace V_{LOOP} , a posição horizontal P.H., a emissão de raios-X duros R-X e a atividade magnetohidrodinâmica osc. MHD. Isto para correntes de 6 e 8kA. Esperávamos observar com essas medidas, um aumento

da densidade e uma queda da temperatura na periferia do plasma, além de uma redução na emissão de raios-X como consequência de uma menor produção de elétrons fugitivos (runaways).

Para a corrente de 6 kA a densidade e a temperatura parecem não ter sofrido qualquer alteração, embora a emissão de raios-X tenha aumentado, contrariando nossas expectativas.

Para a corrente de 8 kA a temperatura também não mudou e a emissão de raios-X voltou a aumentar, mas um acréscimo de densidade foi observado.

Dados e interpretação mais conclusivos, poderiam ter sido obtidos se estivessem operacionais o interferômetro de microondas para a medida da densidade média no decorrer da descarga e o sistema de realimentação do campo vertical para a estabilização da posição da coluna. Do mesmo modo, se o espectrômetro ótico para a medida da temperatura de íons também estivesse operacional, novas possibilidades de investigação estariam disponíveis. Os dois sistemas de diagnóstico citados acima e a realimentação do campo vertical sofreram atrasos consideráveis com relação ao presente projeto e não puderam ser utilizados. Por isso o trabalho realizado é preliminar e deve ser refeito. Para isso a realimentação do campo vertical deve estar em operação, pois o movimento horizontal da coluna de plasma prejudica a interpretação do efeito da injeção pulsada sobre o plasma. A emissão de raios-X duros, por exemplo, pode ser influenciada de dois modos: a) as condições de plasma podem mudar com a injeção de gás, favorecendo o aparecimento de elétrons fugitivos e b) a injeção de gás interfere no

movimento da coluna e pode ocorrer emissão de raios-X por contato dela com o limitador.

Estabilizando a coluna, até mesmo as nossas medidas poderiam ser refeitas e novos dados, um pouco mais conclusivos, obtidos. São que para correntes de até 9 kA seria interessante trocar as sondas que detetam a atividade MHD pelas sondas que determinam a forma da secção transversal da coluna.

O segundo passo seria a instalação do interferômetro, que permitiria obter as variações na densidade média do plasma provocadas pela introdução adicional de gás.

Finalmente um sistema que permitisse mapear a emissão de raios-X na direção toroidal poderia ajudar a distinguir entre os dois efeitos citados acima.

A partir dessas novas condições, as medidas deste trabalho seriam totalmente refeitas e conclusões mais definitivas obtidas. Além disso, é possível ampliar o leque de conclusões se algumas outras mudanças forem implementadas também.

Se o tempo da descarga for mantido em torno de 6 - 7 ms, pode-se aumentar o tempo de subida da corrente de plasma e/ou a energia do sistema de aquecimento ôhmico, a fim de obter uma densidade maior e nas descargas com corrente superior a 10 kA dar melhor estabilidade ao plasma.

Se o tempo da descarga for ampliado, através da inversão de corrente no transformador de aquecimento ôhmico, a instalação de um terceiro banco de capacitores, pode ser interessante. Ele forneceria energia adicional ao plasma de-

pois da injeção de gás, sendo particularmente interessante se em seguida à injeção ocorrer disrupção da coluna.

Além dessas mudanças, seria possível estudar a dinâmica de impurezas no plasma, pela injeção controlada de um gás diferente do hidrogênio no mesmo, em conjunto com espectrômetro ótico com detetor multicanal que permitiria obter temperatura iônica do gás injetado.

APÊNDICE A - CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ESCOAMENTO DE GASES E TECNOLOGIA DE VÁCUO USADOS NESTE TRABALHO

O conceito de "fluxo de gás" (throughput) é largamente usado em tecnologia de vácuo e é definido como a quantidade de gás, em unidades de pressão-volume, fluindo por segundo através de uma secção transversal do sistema. É comumente expresso em TORR.l/s.

O "fluxo de gás" (throughput) pode ser relacionado a grandezas usuais. Vejamos:

$$N = \frac{pV}{kT} \quad \text{A.1}$$

mas diferenciando a equação dos gases ideais com relação ao tempo, para um escoamento a temperatura constante, temos:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{kT} \frac{d(pV)}{dt} = \frac{Q}{kT} \quad \text{A.2}$$

o número de moléculas fluindo por segundo. Rearranjado a eq.

A.2 obtemos:

$$Q = \frac{d(pV)}{dt} = kT \frac{dN}{dt} \quad \text{A.3}$$

Q ainda pode ser expandido na forma:

$$Q = \frac{\partial p}{\partial t} \cdot V + p \frac{\partial V}{\partial t} \quad \text{A.4}$$

Desse modo é fácil ver que se o volume a ser evacuado é fixo, Q se reduz a:

$$Q = \frac{\partial p}{\partial t} \cdot V \quad \text{A.5}$$

que foi a aproximação usada no Capítulo IV.

Outro conceito muito útil em tecnologia de vácuo é a velocidade de bombeamento S. Ela é definida como a taxa volumétrica de fluxo em direção a bomba de vácuo, ou seja:

$$S = \frac{dV}{dT} \quad \text{A.6}$$

Expandindo a derivada total de V com relação ao tempo temos:

$$S = \frac{\partial V}{\partial p} \frac{dp}{dt} + \frac{\partial V}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad \text{A.7}$$

mas se a temperatura não varia durante o escoamento $\frac{dT}{dt} = 0$; além disso se o escoamento estiver no estado estacionário $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$; então a eq. A.7 se reduz a :

$$S = \frac{\partial V}{\partial p} \frac{dp}{dt} \quad \text{A.8}$$

Usando a equação dos gases perfeitos podemos ainda escrever:

$$S = -\frac{V}{p} \frac{dp}{dt} \quad \text{A.9}$$

Integrando esta equação obtemos:

$$S(t_2 - t_1) = -V \ln \frac{p_2}{p_1} \quad \text{A.10}$$

com $t_2 > t_1$ e $p_1 > p_2$. O tempo de bombeamento do vaso, pode ser definido como o tempo para a pressão diminuir a 1/e do valor inicial, isto é:

$$t_{B.V.} = \frac{V_{VASO}}{S}$$

No caso do tokamak TBR-I, $V_{VASO} = 80 \text{ l}$, $S = 60 \text{ l/s}$ [ELI-86], e

$$t_{B.V.} \cong 1,3 \text{ s.}$$

APÊNDICE B - VÁLVULA RÁPIDA ELETROMECÂNICA

Diversas válvulas têm sido construídas para a injeção rápida de gás em sistemas de vácuo [WET-61] [LOW-62] [INO-68] [NOV-70]. Construímos no Laboratório uma válvula eletromecânica de ação rápida para admissão de gás em alto vácuo, com um tempo de abertura da ordem de centenas de microsegundos e uma concepção semelhante a da válvula descrita em [GOR-60].

A válvula (Figura B.1) fica fechada enquanto um disco metálico permanece assentado sobre um anel de vedação, graças à força exercida por uma mola contraída e pela pressão de gás na entrada da válvula. A válvula abre pela interação de dois campos magnéticos: um gerado pela descarga de dois capacitores numa bobina, outro gerado por correntes induzidas no disco metálico. A válvula volta a fechar pela descompressão da mola que age sobre o disco.

Os capacitores ($5\mu\text{F} \times 15\text{kV}$) são alimentados por uma fonte de alta tensão (10 kV) e a descarga é feita através de uma ignitron (NL 1036), sendo o instante do disparo controlado eletronicamente. Nas Figuras B.3 e B.4 mostramos esquemas destes circuitos.

A bobina que aciona a válvula é constituída por uma fita de cobre enrolada sobre si mesma, onde a isolação elétrica entre um passo e outro é feita com mylar e resina epoxi para encapsulamento; a qual serve também, como elemento de fixação mecânica da bobina no corpo da válvula.

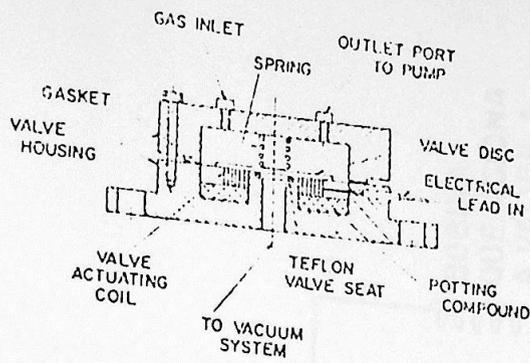


FIG.B.1 - CORTE TRANSVERSAL DA VÁLVULA RÁPIDA ELETROMECAÂNICA [GOR-60].

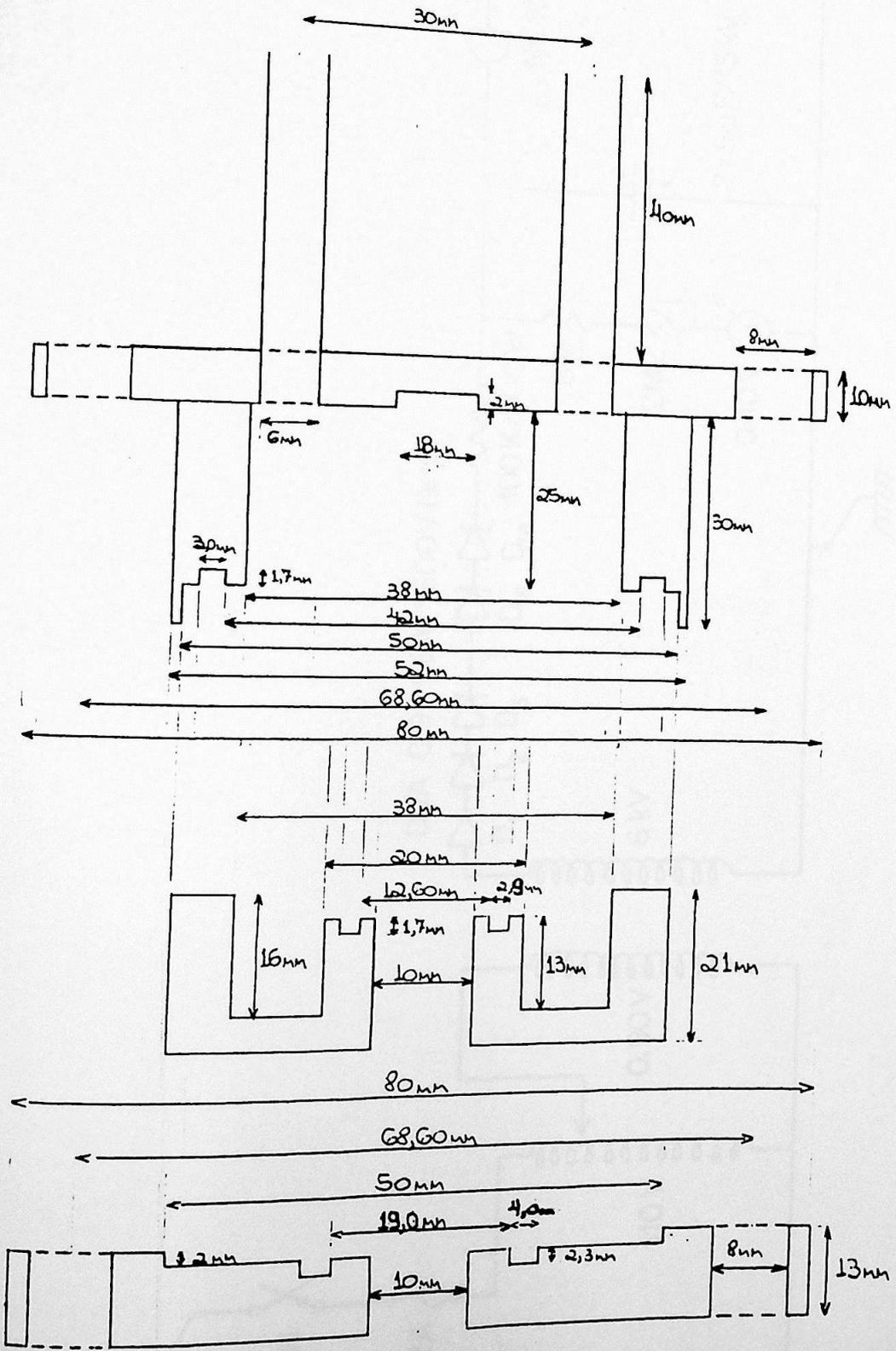


FIG.B.2 - CORTES TRANSVERSAIS DAS TRÊS PEÇAS QUE COMPÕEM O CORPO DA VÁLVULA.

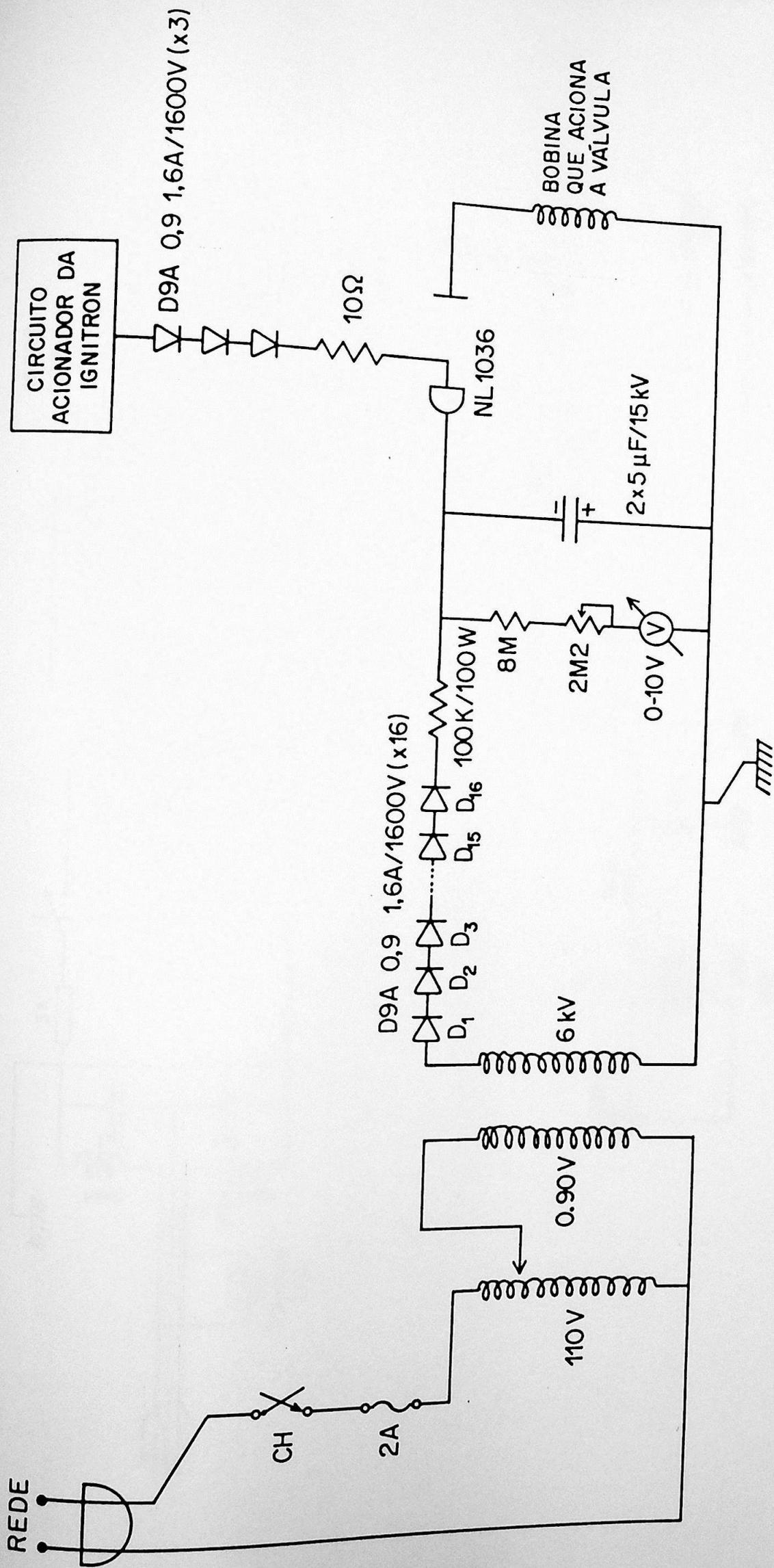


FIG.B.3 - ESQUEMA DO CIRCUITO QUE FORNECE PULSOS DE TENSÃO PARA O FUNCIONAMENTO DA VÁLVULA RÁPIDA.

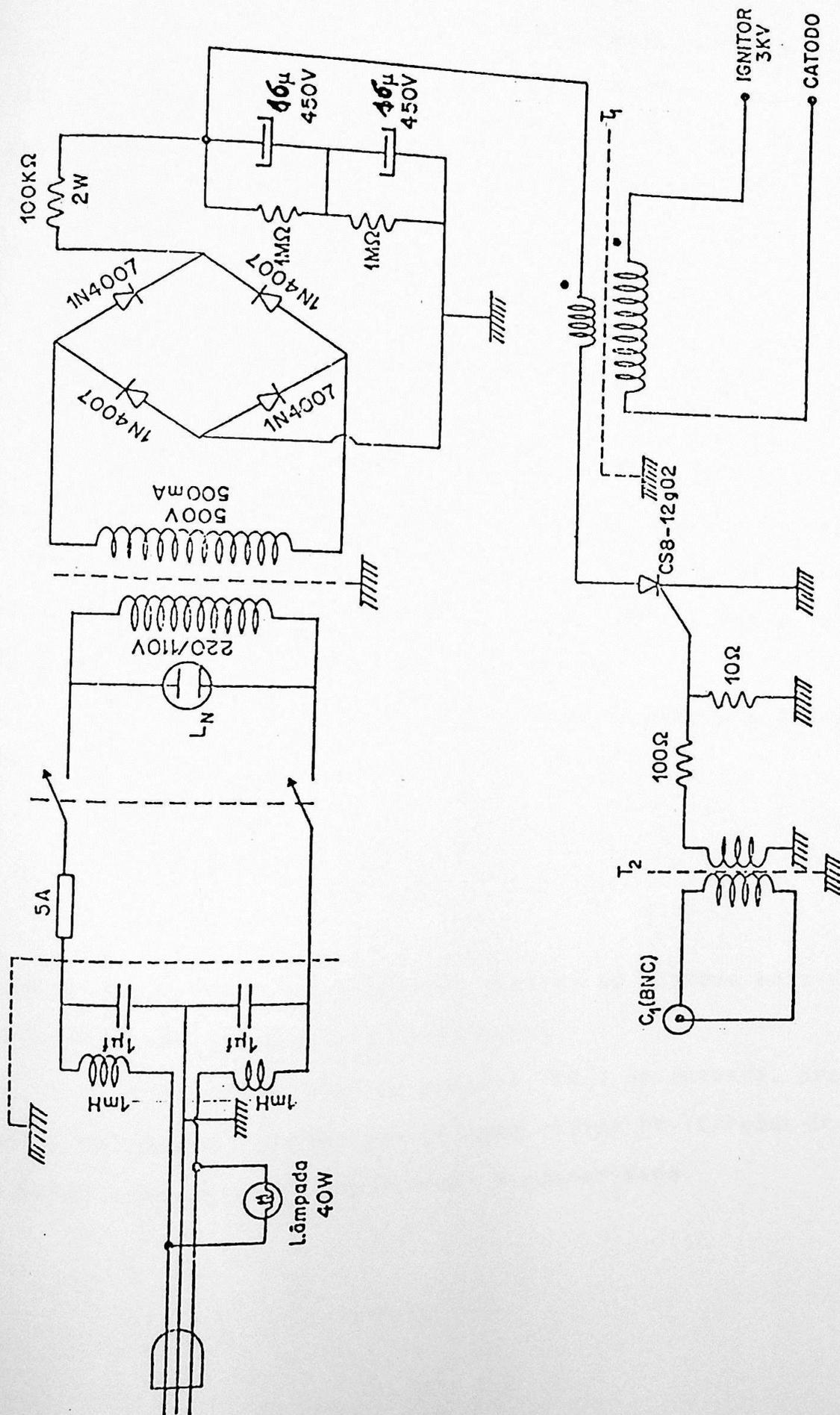


FIG.B.4 - ESQUEMA DO CIRCUITO DISPARADOR DA IGNITRON.

O corpo da válvula foi dimensionado para que ela fosse instalada numa das portas de acesso de menor tamanho do TBR-I. Na Figura B.2 vemos cortes transversais das três peças que o compõe. A bobina descrita acima é encaixada na peça em teflon. Na fotografia B.1 vemos a válvula aberta, enquanto que na Fotografia B.2 mostramos o circuito eletrônico que a aciona.

Embora não tenha sido possível realizar medidas sistemáticas, que resultassem em dados experimentais acerca da válvula, disparos preliminares mostraram que ela abre quando a tensão nos capacitores é de 4 kV. Na Fotografia B.3 temos a tensão no banco de capacitores e a corrente através da bobina que aciona a válvula em função do tempo. Estes sinais mostram que a válvula funciona dentro do esperado.

É possível estimar que o tempo de abertura da válvula é [GOR-60]:

$$t = \frac{\tau}{\pi} \cos^{-1} \frac{V_0}{V_0 + \Delta V}$$

onde τ é o período de oscilação natural do sistema mola-disco e V_0 e ΔV são tensões nos capacitores.

Para instalação no tokamak TBR-I no entanto, preferimos a válvula piezoelétrica de ação rápida PV-10/Veeco devido a maior simplicidade operacional e compacidade.

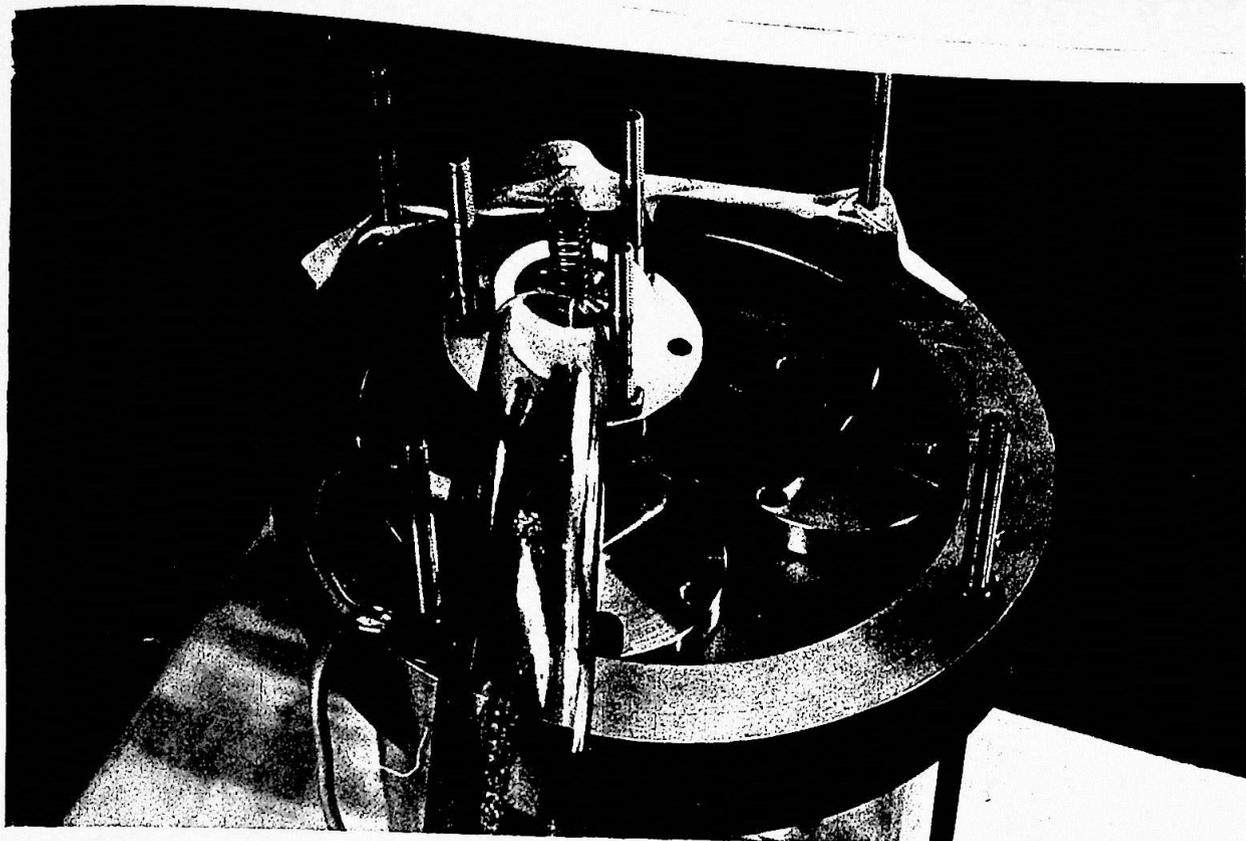


FOTO B.1 - VÁLVULA ABERTA (INSTALADA NA CÂMARA DE VÁCUO PARA TESTES).

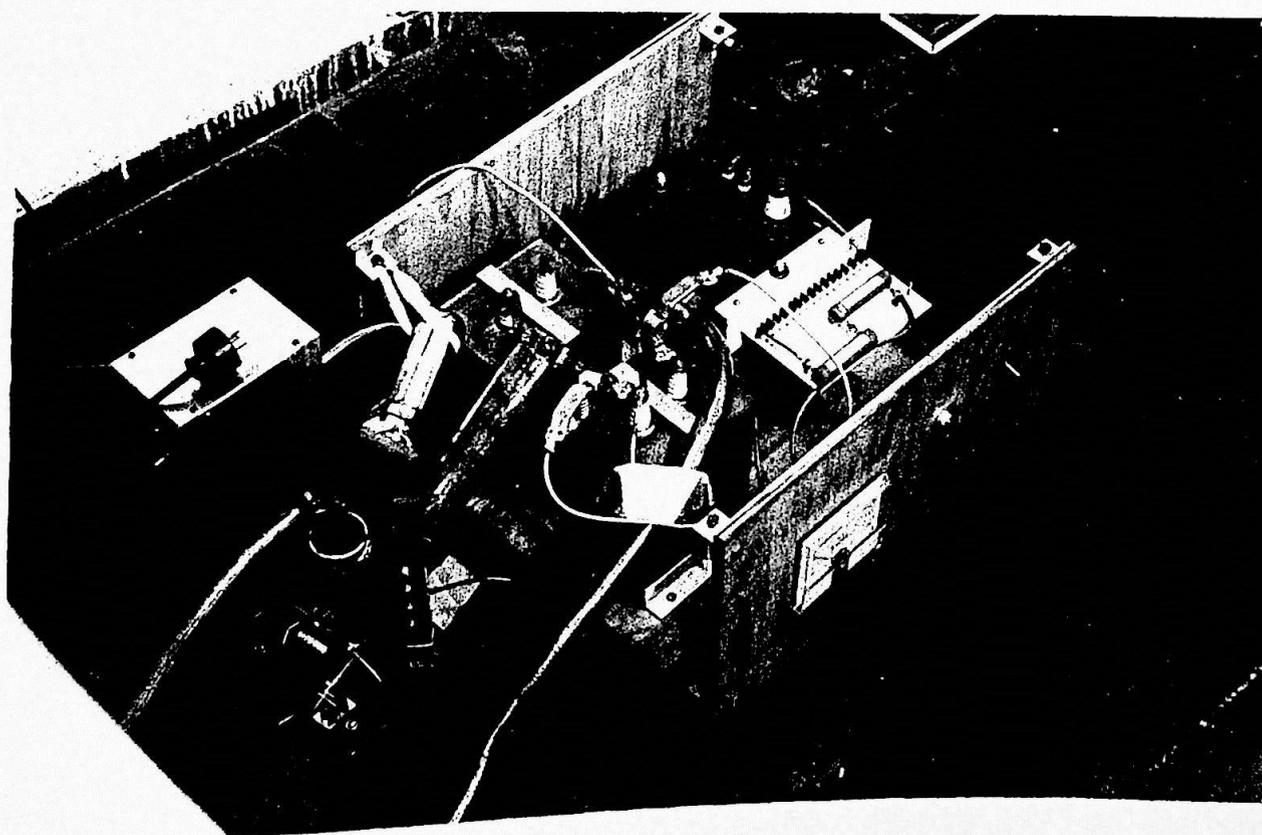
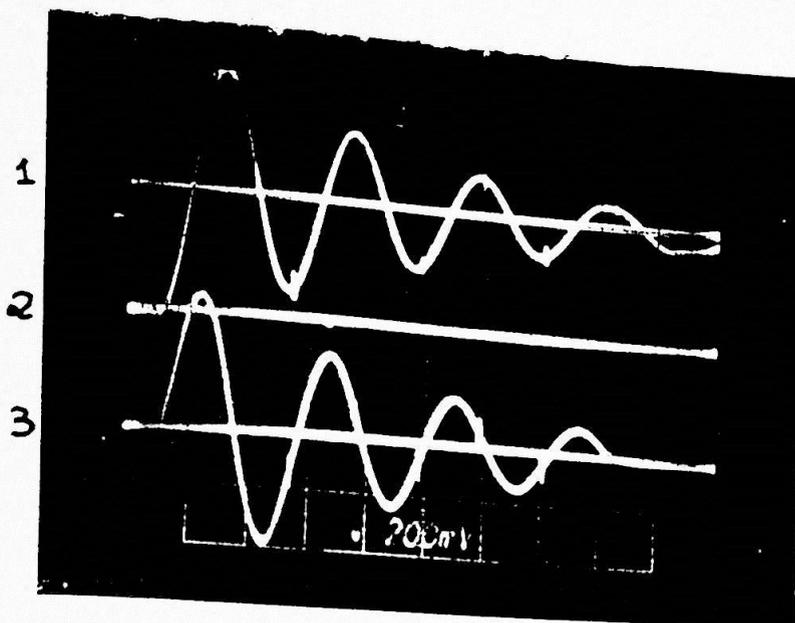


FOTO B.2 - VISTA DO CIRCUITO QUE ACIONA A VÁLVULA.



- O SINAL NA PARTE SUPERIOR DA FOTOGRAFIA É A TENSÃO NO BANCO DE CAPACITORES EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE A DESCARGA DO BANCO.
 - O SINAL NA PARTE INFERIOR DA FOTOGRAFIA É A CORRENTE QUE PERCORRE O CIRCUITO DURANTE A DESCARGA DO BANCO.
 - O TRAÇO HORIZONTAL NÚMERO 1 É O ZERO DO SINAL DE TENSÃO.
 - O TRAÇO HORIZONTAL NÚMERO 2 É O NÍVEL DC INICIAL DO SINAL DE TENSÃO.
 - O TRAÇO HORIZONTAL NÚMERO 3 É O ZERO DO SINAL DE CORRENTE.
- OBSERVE-SE QUE O SINAL DE CORRENTE É UMA SENÓIDE, ENQUANTO QUE O SINAL DE TENSÃO É UMA COSSENÓIDE (COM UM PICO INICIAL EM -2kV JÁ QUE O BANCO É CARREGADO NEGATIVAMENTE), COMO ERA DE SE ESPERAR PARA UM CIRCUITO RLC.
- NA DETECÇÃO DO SINAL DE TENSÃO FOI USADA UMA PONTA DE PROVA COM UM GANHO IGUAL A $1/1000$.
 - NA DETECÇÃO DO SINAL DE CORRENTE FOI USADO UM CIRCUITO RC (COM O PRODUTO $RC = 10^{-3}$) E UMA BOBINA DE ROGOWSKI.

FOTO B.3 - TENSÃO E CORRENTE VERSUS TEMPO, NO CIRCUITO QUE ACIONA A VÁLVULA.

REFERÊNCIAS

- [ART-72] - L.A. ARTSIMOVICH - "Tokamak Devices", Nuc. Fus. 12(1972)215
- [BEN-86] - O.W. BENDER - "Campos Ressonantes Helicoidais no Tokamak TBR", Dissertação de Mestrado, IFUSP, 1986
- [BOS-81] - E.BOSCO - "Formação do Plasma no TBR", Dissertação de Mestrado, IFUSP, 1981
- [BRU-82] - R. BRUHA - "Determinação da Intensidade e Energia dos Raios-X produzidos por Elétrons Fugitivos no TBR-I", Trabalho de Iniciação Científica, IFUSP, 1982
- [BUR-76] - K.H. BURRELL - "Effect of Particle and Heat Sources on Impurity Transport in Tokamak Plasmas", Phys. Fluids 19(1976)401
- [BUR-78] - K.H. BURRELL - "Fast Hydrogen Gas Injection System for Plasma Physics Experiments", Rev. Sci. Instr. 49(1978)948
- [CaO-81] - Catálogo da "OXIGÊNIO DO BRASIL S.A.", 1981
- [CaR-82] - Catálogo da "RESOURCE SYSTEMS, INC.", 1982
- [CON-86] - M.E. CONDE - "Determinação da Seção Transversal da Coluna de Plasma no Tokamak TBR-I", Dissertação de Mestrado, IFUSP, 1986
- * [CrJ-86] - R.P. SILVA, I.C. NASCIMENTO, D.F. CRUZ JR., A. HERSHOVITCH - "Electrostatic Ion Probe Tokamak Plasma Edge Diagnostic", Rev. Sci. Instr.

- [CRO-83] - R.C. CROSS E OUTROS - "Effects of Discharge Cleaning on the Production of Runaway Electrons in Torus Tokamak", Nuc. Fus. 23(1983)791
- [DAL-82] - R.S. DALLAQUA - "Sondas de Langmuir em Regime não Colisional", Dissertação de Mestrado, IFUSP, 1982
- [DRE-59] - H. DREICER - "Electron and Ion Runaway in a Fully Ionized Gas I", Phys. Rev. 115(1959)238
- [DRE-60] - H. DREICER - "Electron and Ion Runaway in a Fully Ionized Gas II", Phys. Rev. 117(1959)329
- [ELI-86] - J.I. ELIZONDO - "Condicionamento do Tokamak TBR-1 por Plasma gerado por Microondas", Dissertação de Mestrado, IFUSP, 1986
- [FAG-82] - A.N. FAGUNDES, I.C. NASCIMENTO, R.P. SILVA, R.S. DALLAQUA, E.K. SANADA - "Limpeza por descarga no TBR", Rev. Br. Fís. Vol. Esp. II(Fev/1982)324
- [FER-80] - J.L. FERREIRA - "Diagnóstico de Plasma Toroidal com Sondas Magnéticas", Dissertação de Mestrado, IFUSP, 1980
- [FUR-75] - H.P. FURTH - "Tokamak Research", Nuc. Fus. 15(1975) 487
- [GIB-76] - A. GIBSON - "Radiation Limits to Tokamak Operation", Nuc. Fus. 16(1976)546
- [GOR-60] - B. GOROWITZ, K. MOSES e P. GLOERSEN - "Magnetically driven Fast-Acting for Gas Injection into High Vacua", Rev. Sci. Inst. 31(1960)146
- [GOR-71] - E.P. GORDUNOV E OUTROS - "Measurements of the Diffusion Lifetime of a Plasma in Tokamak-3 by the Neutral Hydrogen Injection Method", Nuc. Fus. 11(1971) 433

- [GUR-78] - A.V. GUREVICH e Y.S. DIMANT - "Kinetic Theory of Runaway Production in Toroidal Magnetic Devices", Nuc. Fus. 18(1978)629
- [HAS-81] - R.J.HASTIE - em "Plasma Physics and Nuclear Fusion Research", editado por Richard D. Gill (Academic Press, New York, 1981), pag. 43
- [INN-79] - K.H. BURREL E OUTROS - Nuc. Fus., Suplemento 1979, vol. I, p. 269
- [INO-68] - N. INOUE e T. UCHIDA - "New Type of High Speed Valve", Rev. Sci. Inst. 39(1968)1461
- [KNO-79] - H.KNOEPFEL e D.A. SPONG - "Review Paper-Runaway Electrons in Toroidal Discharges", Nuc. Fus. 19 (1979)785
- [LEH-75] - B. LEHNERT - "Density Limit of Tokamak Experiments", Nuc. Fus. 15(1975)793
- [LEH-83] - B. LEHNERT - "Density Limit of Tokamaks", Nuc. Fus. 23(1983)1327
- [LEY-82] - LEYBOLD-HERAEUS GMBH - "Vacuum Technology, its Foundations, Formulas and Tables", 1982
- [LOW-62] - R.S. LOWDER e F.C. HOH - "Fast Gas Valve for Plasma Research", Rev. Sci. Inst. 33(1962)1236
- [MUR-76] - M. MURAKAMI e OUTROS - "Some Observations on Maximum Densities in Tokamak Experiments", Nuc. Fus. 16(1976) 347
- [NOE-79] - Kits NOVA ELETRÔNICA - "Manual do DPM-LCD", Editele, 1979
- [NOV-70] - B. NOVAK e S.PEKAREK - "A Fast Acting All-Metal Gas Valve for Plasma Research", Rev. Sci. Inst. 41(1970) 369

- [OHK-74] - T.OHKAWA-KAKUYUGO-KENKYU 32(1974)67
- [RIB-87] - C. RIBEIRO - "Medida dos Perfis Radial e Temporal do Potencial de Plasma no TBR", Trabalho de Iniciação Científica, IFUSP, 1987
- [ROB-83] - D.E. ROBERTS- "Density and Confinement Time Limits of Ohmically Heated Tokamaks", Nuc. Fus. 23(1983) 311
- [SAN-83] - E.K. SANADA - "Estudo de Parâmetros do Plasma no TBR-I a partir de Medidas Espectroscópicas na Região Óptica", Dissertação de Mestrado, IFUSP, 1983
- [SAN-86] - E.K. SANADA - "Procedimento para Injeção de Gás", Memorando Interno nº 1, IFUSP, 1986
- [SIL-80] - R.P. SILVA - "Sistema Eletrônico do TBR", Dissertação de Mestrado, EPUSP (Depto. Eng. Elétrica), 1980
- [SIL-88] - R.P. SILVA - "Difusão Induzida por Ondulação do Campo num Tokamak", Tese de Doutorado em andamento, IFUSP, Término previsto para 1988
- [SIM-78] - S.W. SIMPSON, I.C. NASCIMENTO, R.M.O. GALVÃO, R.P. SILVA, R.M. DROZAK, A.N. FAGUNDES e J.H. VUOLO - "Design of the TBR Tokamak", IFUSP/P-155, LFP-2, 1978
- [STO-75] - P.E. STOTT - "Control of Recycling and Impurities in ATC Tokamak by means of Gettered Surfaces", Nuc. Fus. 15(1975)431
- [TAN-84] - I.H. TAN - "Oscilações MHD no TBR-I", Dissertação de Mestrado, IFUSP, 1984
- [TAN-85] - I.H. TAN, J.L. CALDAS, I.C. NASCIMENTO, A. VANNUCCI, J.I. ELIZONDO, R.P. SILVA, E.K. SANADA - "Estudo dos Efeitos de Impurezas na Estabilidade MHD do Tokamak TBR-I", Cien. Cult. (Supl. Esp.) 37(1985)317

- [TOI-78] - K. TOI e OUTROS - "Tokamak Experiments on JIPP T-II with Pulsed Gas Injection", Nagoya University Research Report IPPJ-322(1978)
- [UET-85] - A.Y. UETA - "Campo Vertical de Equilíbrio no Tokamak TBR", Dissertação de Mestrado, IFUSP, 1985
- [VAN-87] - A. VANNUCCI - "Instabilidades de Disruptura no TBR-I", Tese de Doutorado, IFUSP, 1987
- [VER-72] - V.A. VERSHKOV e S.V. MIRNOV - "Role of Impurities in Current Tokamak Experiments", Nuc. Fus. 14(1974)383
- [WET-61] - D.M. WETSTONE - "Fast-Acting Gas Valve", Rev. Sci. Inst. 32(1961)1209