



PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA  
SECRETARIA ESPECIAL DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS**

BR

INPE -- 4953 .



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS

AUTORES/AUTHORS

Sensor                      Medidor                      Pressão

AUTORIZADO POR/AUTHORIZED BY

*Gerson*  
Gerson Otto Ludwig  
Chefe do IAP

AUTOR RESPONSÁVEL  
RESPONSIBLE AUTHOR

*J.O. Rossi*  
J.O. Rossi

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION

INTERNA / INTERNAL

EXTERNA / EXTERNAL

RESTRITA / RESTRICTED

REVISADO POR / REVISED BY

*Julio*  
Julio Guimarães Ferreira

CDU/UDC

533.9

DATA/DATE

Novembro, 1989

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO
	INPE-4953-RPE/602
CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UM MEDIDOR DE PRESSÃO DE GÁS COM ALTA RESOLUÇÃO TEMPORAL	
AUTORES/AUTHORSHIP	J.O. Rossi C. Santos M. Ueda

ORIGEM ORIGIN

LAP

PROJETO PROJECT

PRAD

Nº DE PAG.  
NO OF PAGES

32

ULTIMA PAG.  
LAST PAGE

27

VERSÃO VERSION

Nº DE MAPAS  
NO OF MAPS

RESUMO-NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Neste relatório, descrevem-se a construção e a calibração de um medidor de gás com resolução temporal melhor que 20  $\mu$ s. O medidor consiste basicamente num transdutor do tipo SIR (Sensor de Ionização Rápido) e num circuito eletrônico adequado. Uma válvula eletrônica do tipo pentodo 6AU6A sem a ampola de vidro é usada como cabeça sensora.

OBSERVAÇÕES/REMARKS

ABSTRACT

*In this report, the construction and calibration of a gas pressure meter with a time resolution better than 20  $\mu$ s are described. The meter consists basically of a sensor of the FIG (Fast Ionization Gauge) type and an adequate electronic circuit. A 6AU6A pentode vacuum tube without the glass envelope is used as the sensor head.*

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	vii
1 - Introdução .....	1
2 - Descrição do medidor .....	2
2.1 - Fonte de polarização .....	6
2.2 - Amplificador de corrente .....	14
3 - Calibração do medidor e curva de calibração .....	20
4 - Resultados experimentais e conclusão .....	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	27

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Esquema do sistema de medição da pressão de gás .....	1
2 - Diagrama de blocos do medidor de pressão de resposta rápida .....	3
3 - Fotografia do topo da caixa do circuito eletrônico do medidor do LAP .....	4
4 - Aquecedor .....	5
5 - Fonte de polarização .....	7
6 - Amplificador de corrente .....	15
7 - Curva de calibração do medidor .....	21
8 - Sinais mostrados no osciloscópio de memória para caracterização da medida de pressão (1ª condição) .....	22
9 - Sinais mostrados no osciloscópio de memória para caracterização da medida de pressão (2ª condição) .....	23

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1 - Características principais do pentodo 6AU6A .....	5
2 - Características principais do zener 1N972 .....	10
3 - Parâmetros elétricos principais do transistor BF458 .....	13

## 1 - INTRODUÇÃO

Os medidores de pressão normalmente utilizados para medir pressões de  $10^{-4}$  a  $10^{-1}$  Torr (do tipo Pirani, Penning ou por ionização) possuem resposta lenta no tempo, e dessa forma não podem ser utilizados para medir pressões de gás ejetado por uma válvula de injeção rápida de gás (VIRG).

Portanto, desenvolveu-se no Laboratório Associado de Plasma (LAP) do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) um medidor de pressão de gás de resposta rápida, constituído de um transdutor do tipo SIR (Sensor de Ionização Rápido) e de um circuito eletrônico adequado. A Figura 1 ilustra o sistema de medição da pressão de gás.

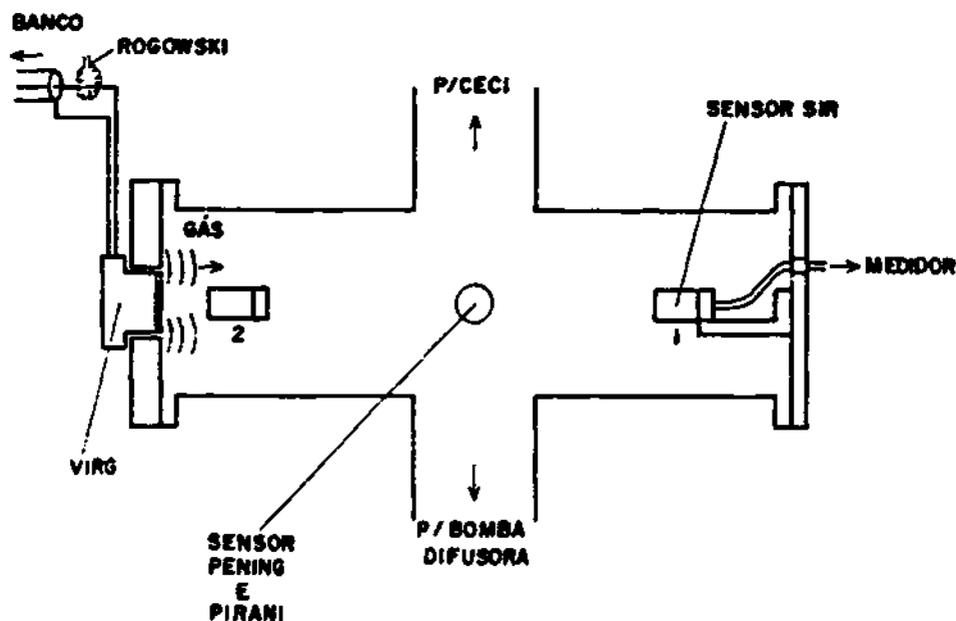


Fig. 1 - Esquema do sistema de medição da pressão de gás.

Conforme se observa na Figura 1, a válvula de injeção rápida de gás é instalada numa das extremidades da câmara de vácuo que serve de interface entre o dispositivo CECI (Configuração de Estricção a Campo Inverso) e a bomba difusora. O dispositivo CECI é usado para o estudo de confinamento de plasma (Aso et. al., 1988). O sensor SIR pode ser instalado próximo à válvula ou colocado na extremidade oposta da câmara de vácuo (posição 2 ou 1, respectivamente).

A válvula de injeção rápida de gás consiste basicamente num dispositivo com um reservatório de gás cuja saída é selada através de um disco de alumínio que é impulsionado eletromagneticamente, permitindo um rápido escape de gás. O campo magnético de repulsão é produzido através de uma descarga de um banco de capacitores no solenóide da válvula. A corrente no solenóide da válvula é medida com uma bobina de Rogowski. Maiores detalhes do princípio de funcionamento e de resultados experimentais sobre a válvula VIRG podem ser obtidos em Ueda et. al., 1989.

Quando ocorre o escape de gás, a frente de pressão de gás chega ao sensor que detecta esta variação de pressão no interior da câmara de vácuo. O sensor converte esta variação de pressão em um pulso elétrico que é mostrado num osciloscópio de memória, após passar por um estágio de amplificação.

## 2 - DESCRIÇÃO DO MEDIDOR

Uma válvula eletrônica do tipo pentodo 6AU6A é usada como sensor, cuja ampola de vidro é removida pouco antes de ser introduzida na câmara de vácuo. Para melhorar o tempo de resposta do sensor, remove-se também cerca de 40% da placa metálica que envolve a região central da válvula. A Figura 2, mostra o diagrama de blocos do medidor de gás, onde se pode observar como o sensor está ligado ao circuito eletrônico.

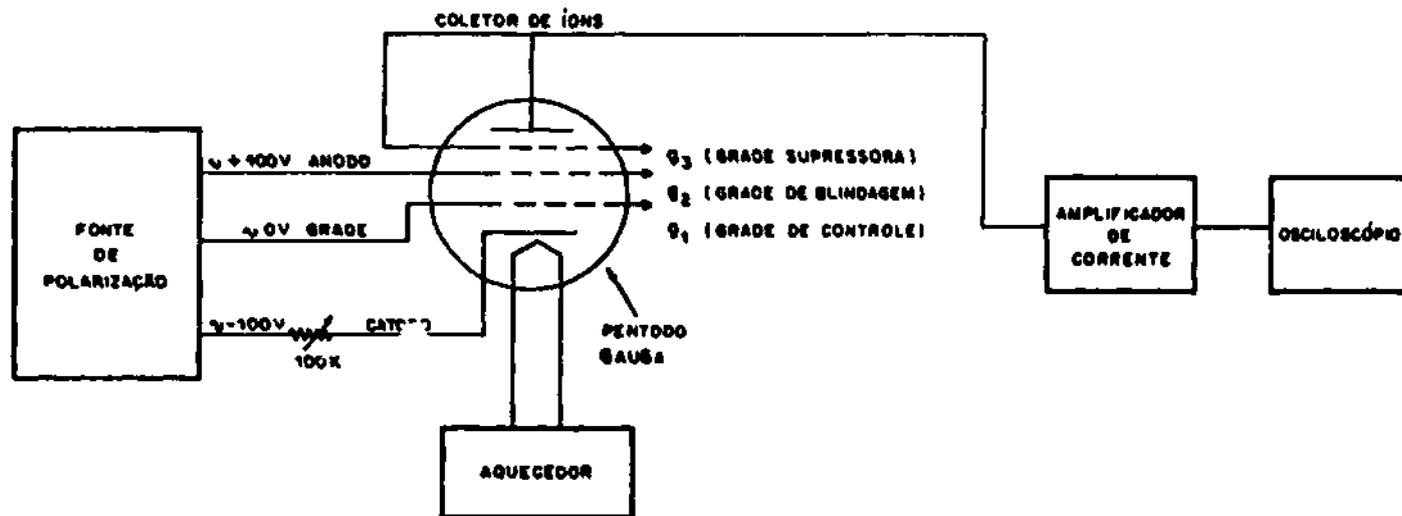


Fig. 2 - Diagrama de blocos do medidor de pressão de resposta rápida.

A Figura 3 mostra uma fotografia do topo da caixa do circuito eletrônico do medidor desenvolvido no LAP.

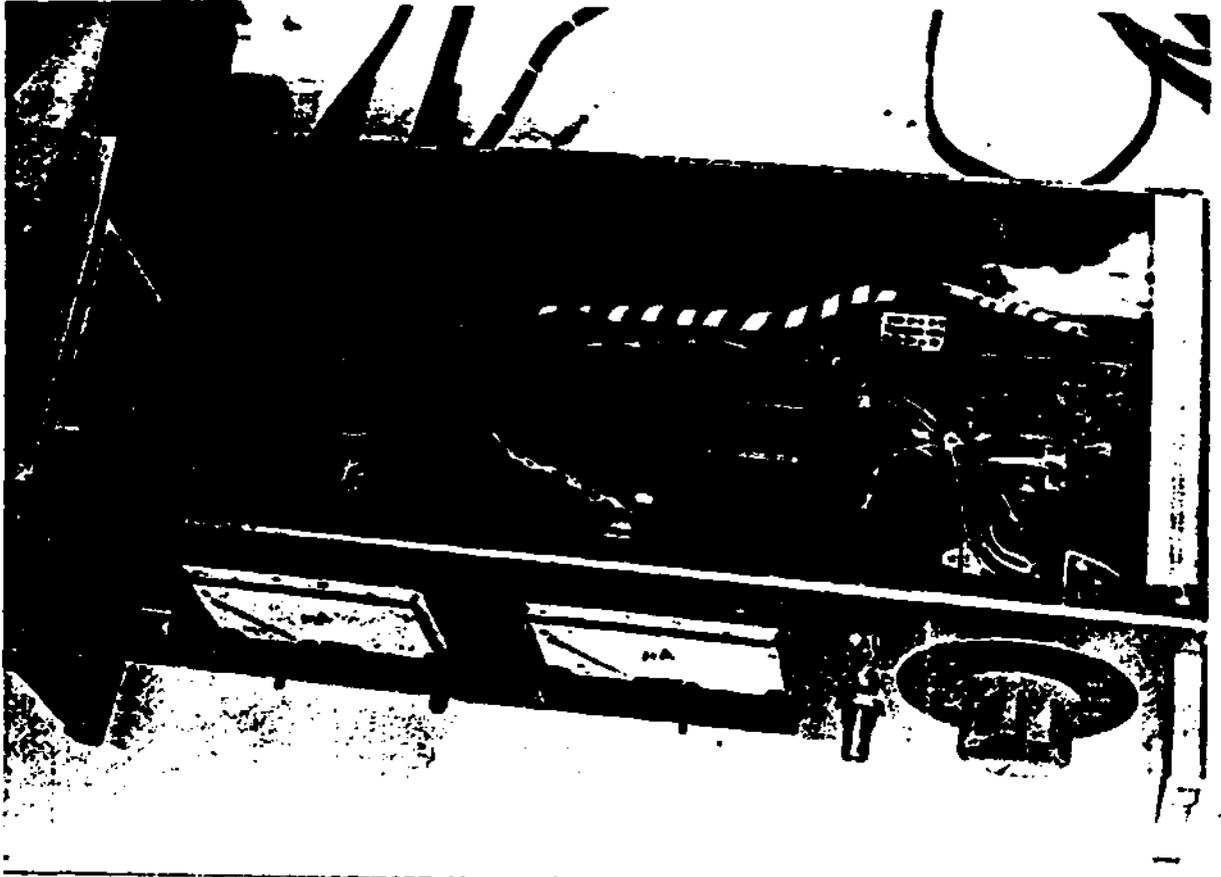


Fig. 3 - Fotografia do topo da caixa do circuito eletrônico do medidor do LAP.

O sensor e o circuito eletrônico do medidor foram baseados num medidor de pressão de gás com alta resolução temporal, previamente construído na Universidade de Cornell, U.S.A. (Pedrow, 1985).

As características principais do pentodo 6AU6 encontram-se listadas na Tabela 1.

TABELA 1

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO PENTODO 6AU6A

Tensão de filamento (A.C.)	6,3 V
Corrente de filamento (A.C.)	300 mA
Tensão de placa (máx.)	250 V
Corrente de placa (máx.)	12,2 mA
Tensão de grade 1 ( $g_1$ )	- 4 V
Resistência de placa ( $r_p$ )	7500 $\Omega$
Transcondutância ( $g_m$ )	4800 $\mu S$
Coefficiente de amplificação	36

Para funcionar corretamente, o medidor exige 3 circuitos: aquecedor, fonte de polarização e amplificador de corrente (Figura 2).

O aquecedor é responsável pelo aquecimento da válvula 6AU6A. Consiste apenas numa simples fonte de 12,6 V (a.c.), que é constituída basicamente de um transformador abaixador de tensão de 110/12,6 V com capacitores de desacoplamento de radiofrequência na saída, conforme se pode observar na Figura 4.

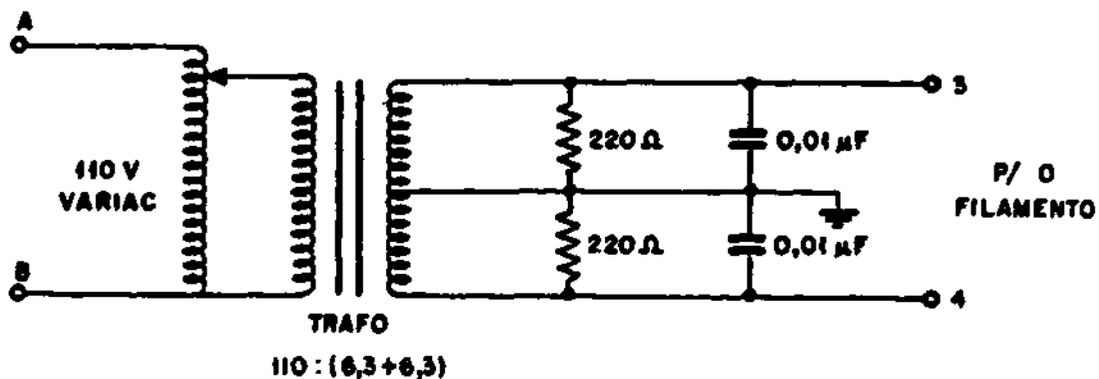


Fig. 4 - Aquecedor.

Quando usada como sensor de pressão, a válvula 6AUGA trabalha superaquecida para aumentar a taxa de emissão de elétrons, isto é, é usado o dobro da tensão nominal de filamento, cujo valor é de 6,3V (ver Tabela 1). A remoção da ampola de hidrógeno do pentodo e a sobretensão de filamento fazem com que a vida média do tubo seja reduzida a um tempo de uma ou duas semanas, independentemente da sua operação, desde que o tubo seja mantido em vácuo.

Contudo, para haver emissão de elétrons é necessária uma fonte de polarização que ajusta determinados níveis de tensão em diversos eletrodos do pentodo (catodo, grades de controle e de blindagem). Conforme se pode observar na Figura 2, a grade de blindagem do pentodo ( $g_2$ ) funciona como o anodo do sensor de pressão e a grade de controle ( $g_1$ ), juntamente com o catodo, operam de uma maneira semelhante àquela desempenhada no pentodo. O catodo é o eletrodo responsável pela formação de uma nuvem eletrônica, cujos elétrons são acelerados pela diferença de potencial (d.d.p.) anodo-catodo (VAK) e freados pelo potencial negativo da grade  $g_1$  em relação ao catodo. A fonte de polarização fornece potencial de grade  $g_1$  de 0 a 20V em relação ao terra do circuito e tensão de saída ( $V_s$ ), de 110 a 210V aproximadamente (Figura 5).

A grade supressora ( $g_3$ ) da válvula e a sua placa formam o coletor de íons do sensor, sendo para isso ligadas uma à outra.

## 2.1 - FONTE DE POLARIZAÇÃO

Observando a Figura 5, verifica-se que a fonte de polarização consiste basicamente num duplicador de tensão de entrada e num circuito regulador série na saída. O transformador de entrada possui a relação de 1:1 e faz apenas a isolação da fonte de polarização da rede.

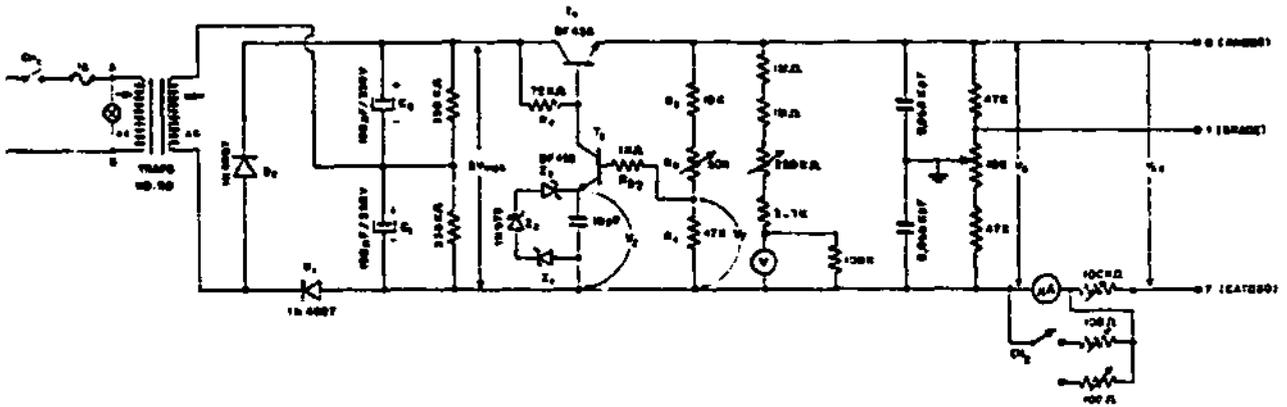


Fig. 5 - Fonte de polarizaçãõ.

O duplicador de tensãõ funciona da seguinte maneira: quando a tensãõ de entrada  $\bar{e}$  positiva (semiciclo positivo), o diodo  $D_1$  estã conduzindo e carregando o capacitor  $C_1$  com o valor de pico da tensãõ de entrada ( $V_{m\bar{a}x} = 155V$ ). Desta forma, o capacitor  $C_1$  adquire a polaridade indicada na Figura 5. Ainda neste semiciclo, o diodo  $D_2$  estã cortado devido à polarizaçãõ negativa do seu anodo. No momento em que a tensãõ de entrada passa ao semiciclo negativo, o diodo  $D_1$  fica inversamente polarizado e para de conduzir, passando o diodo  $D_2$  à conduçãõ ao ficar diretamente polarizado. Portanto,  $C_2$  fica carregado com o valor de pico da tensãõ de entrada, de acordo com a polaridade indicada na Figura 5. Dessa maneira tem-se  $2V_{m\bar{a}x}$  (310V) na saída do duplicador de tensãõ. Como nãõ hã muito consumo de corrente, a tensãõ contĩnua de saída pode ser considerada como  $2V_{m\bar{a}x}$ , pois a fonte de polarizaçãõ trabalha com correntes de carga ( $I_s$ ) da ordem de 2 mA. Os resistores de 330K colocados em paralelo com os capacitores  $C_1$  e  $C_2$  funcionam como resistores de descarga e de equalizaçãõ.

O circuito regulador sãrie consiste num sistema realimentado, no qual  $\bar{e}$  utilizado um elemento de controle (transistor  $T_1$ ) que irã controlar a tensãõ de saída  $V_s$ , conforme mostra a Figura 5, a partir de uma tensãõ de correçãõ enviada a ele atravães de um comparador. O transistor  $T_2$  desempenha esta funçãõ, comparando uma tensãõ de referãncia ( $V_z = \text{somatõria das tensões dos zeners } z_1, z_2, z_3$ ) com uma tensãõ de re

alimentação ( $V_f$ ) proporcional a  $V_s$ . Não havendo diferenças na comparação, o comparador não irá alterar a polarização do circuito de controle. Havendo alguma diferença, irá aparecer na saída do comparador uma tensão de correção (erro) que será enviada ao elemento de controle para proceder à correção da tensão  $V_s$ . Para melhor interpretação do circuito supõe-se que haja uma variação da tensão de entrada ( $V_{in} = 2V_{max}$ ), por exemplo, um aumento. Dessa maneira, a tensão  $V_s$  tende a aumentar. Um aumento da tensão  $V_s$  provoca um acréscimo de  $V_f$ . Como a tensão no emissor de  $T_2$  é fixada pela referência, um aumento de  $V_f$  provoca um aumento da corrente de base do transistor  $T_2$  ( $I_{B_2}$ ), que, por sua vez, faz com que haja uma elevação da corrente de coletor de  $T_2$  ( $I_{C_2}$ ). Aumentando  $I_{C_2}$ , tem-se uma maior queda de tensão sobre  $R_4$ , uma vez que a tensão no emissor de  $T_2$  é constante e, conseqüentemente há uma redução na tensão coletor-emissor de  $T_2$  ( $V_{ce_2}$ ). Com isso, tem-se um aumento da tensão coletor-emissor de  $T_1$  ( $V_{ce_1}$ ) pois:

$$V_{ce_1} = V_{be_1} + V_{cb_1} \quad (1)$$

e

$$V_{cb_1} = V_{R_4} \quad (2)$$

onde:

$V_{ce_1}$  = tensão coletor-emissor de  $T_1$ ;

$V_{cb_1}$  = tensão coletor-base de  $T_1$ ;

$V_{be_1}$  = tensão base-emissor de  $T_1 = 0,7$  V;

$V_{R_4}$  = queda de tensão sobre  $R_4$ .

Conseqüentemente, há uma diminuição da tensão  $V_s$ , que resulta numa diminuição da corrente de base do transistor  $T_1$  ( $I_{B_1}$ ) e numa estabilização da tensão de saída da fonte de polarização.

A tensão de saída  $V_s$  da fonte de polarização pode ser dada por:

$$V_S = V_f \times \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{R_1} \quad (3)$$

onde  $R_1, R_2, R_3$ , são resistores: que formam o divisor de tensão que controla  $V_S$ , sendo  $R_2$  ajustável (potenciômetro).

Através da Figura 5, pode-se observar que a tensão  $V_f$  pode ser escrita como:

$$V_f = V_{be_2} + R_{b_2} \times I_{b_2} + V_Z \quad (4)$$

onde:

$R_{b_2}$  = Resistência de base de  $T_2$ ;

$I_{b_2}$  = Corrente de base de  $T_2$ ;

$V_{be_2}$  = Tensão base-emissor de  $T_2$ ;

$V_Z$  = Somatória das tensões dos zeners =  $V_{Z_1} + V_{Z_2} + V_{Z_3}$ .

Como  $V_{be_2} \ll V_Z$  ( $V_{be_2} = 0,7$  V) e  $I_{b_2}$  possui um valor muito pequeno (da ordem de  $\mu A$ ), a Equação 4 torna-se:

$$V_f \approx V_Z \quad (5)$$

Substituindo a Equação 5 na Equação 3, tem-se que  $V_S$  vale aproximadamente:

$$V_S \approx V_Z (1 + R_2/R_1 + R_3/R_1) \quad (6)$$

O zener escolhido (1N972) para a tensão de referência possui as seguintes características (Tabela 2).

TABELA 2

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO ZENER 1N972

Corrente típica do zener ( $I_Z$ )	4,2 mA
Potência máxima do zener ( $P_{Z_{\max}}$ )	0,5 W
Tensão de estabilização do zener ( $V_Z'$ )	30 V

Como se trata de 3 zeners ligados em série, tem-se que a tensão vale:

$$V_Z = 3 \times V_Z' = 3 \times 30 \text{ V} = 90 \text{ V.} \quad (7)$$

Os resistores escolhidos para o divisor de tensão que controla a tensão  $V_S$  possuem o seguinte valor:  $R_1 = 47 \text{ K}\Omega$ ;  $R_2 = 0 - 50 \text{ K}\Omega$  e  $R_3 = 10 \text{ K}\Omega$ .

Dessa forma, através da Equação 6, tomando-se  $R_2 = 50 \text{ K}\Omega$ , pode-se calcular a tensão de saída máxima ( $V_{S_{\max}}$ ):

$$V_{S_{\max}} = 90 \text{ V} \times \left( 1 + \frac{50 \text{ K}\Omega}{47 \text{ K}\Omega} + \frac{10 \text{ K}\Omega}{47 \text{ K}\Omega} \right) \approx 205 \text{ V.} \quad (8)$$

Tomando-se  $R_2 = 0$ , pode-se calcular a mínima tensão de saída ( $V_{S_{\min}}$ ):

$$V_{S_{\min}} = 90 \text{ V} \times \left( 1 + \frac{10 \text{ K}\Omega}{47 \text{ K}\Omega} \right) \approx 109 \text{ V.} \quad (9)$$

As tensões  $V_{S_{\max}}$  e  $V_{S_{\min}}$  medidas foram respectivamente 213 V e 107 V, cujos valores estão próximos dos resultados teóricos (Equações 8 e 9, respectivamente). Isto confirma a validade dos cálculos.

A corrente máxima que passa pelo zener ( $I_{Z_{\max}}$ ) no circuito regulador série pode ser aproximada por:

$$I_{Z\max} = \frac{V_{cb1\max}}{R_4}, \quad (10)$$

onde:

$V_{cb1\max}$  = tensão coletor-base máxima de  $T_1$ ;

$R_4$  = resistor de polarização dos zeners.

A tensão  $V_{cb1\max}$  pode ser escrita através da seguinte equação:

$$V_{cb1\max} = 2V_{m\max} - V_{sm\min} - V_{be1}, \quad (11)$$

onde:

$2 V_{m\max}$  = tensão máxima de saída do duplicador;

$V_{be1}$  = tensão base-emissor de  $T_1$ ;

$V_{sm\min}$  = tensão mínima de saída.

Substituindo a Equação 11 na Equação 10, tem-se que  $I_{Z\max}$  vale:

$$I_{Z\max} = \frac{2 V_{m\max} - V_{sm\min} - V_{be1}}{R_4}. \quad (12)$$

Sendo  $2 V_{m\max} = 310 \text{ V}$ ;  $V_{sm\min} = 109 \text{ V}$ ;  $V_{be1} = 0,7 \text{ V}$  e  $R_4 = 75 \text{ K}\Omega$ , tem-se que:

$$I_{Z\max} = \frac{(310\text{V} - 109\text{V} - 0,7\text{V})}{75 \text{ K}\Omega} = 2,67 \text{ mA}. \quad (13)$$

Como  $I_Z$  (típico) =  $4,2 \text{ mA} > I_{Z\max} = 2,67 \text{ mA}$ , verifica-se que os zeners não trabalham sobrecarregados, isto é, com excessivo consumo de potência.

A potência máxima do resistor  $R_4$  ( $P_{R_4\max}$ ) pode ser calculada

lada através da seguinte expressão:

$$P_{R_4} = \frac{V_{cb1\max}^2}{R_4} = \frac{(2V_{m\max} - V_{sm\min} - V_{be1})^2}{R_4} = \frac{(310V - 109V - 0,7V)^2}{75\text{ K}\Omega} = 0,5\text{ W.}$$

O transistor  $T_2$  deve ser escolhido de tal forma que ele satisfaça as seguintes condições:

$$V_{ce2\max} > [(V_{sm\max} + V_{be1}) - V_Z]; \quad (15)$$

$$I_{c2\max} > I_{zm\max}; \quad (16)$$

$$P_{C2\max} > [(V_{sm\max} + V_{be1}) - V_Z] \times I_{zm\max}. \quad (17)$$

Sabendo que  $V_{sm\max} = 205\text{ V}$ ;  $V_{be1} = 0,7\text{ V}$ ;  $V_Z = 90\text{ V}$  e  $I_{zm\max} = 2,67\text{ mA}$ , tem-se que:

$$V_{ce2\max} > [(205V + 0,7V) - 90V] = 115,7V; \quad (18)$$

$$I_{c2\max} > 2,67\text{ mA}; \quad (19)$$

$$P_{C2\max} > 115,7V \times 2,67\text{ mA} = 0,31\text{ W.} \quad (20)$$

E o transistor  $T_1$  deve ser escolhido de tal forma que:

$$V_{ce1\max} > (2V_{m\max} - V_{sm\min}); \quad (21)$$

$$I_{c1\max} > I_{sm\max}; \quad (22)$$

$$P_{C1\max} > (2V_{m\max} - V_{sm\min}) \times I_{sm\max}. \quad (23)$$

Sabendo que a corrente máxima de carga ( $I_{sm\max}$ ) ou de polarização é da ordem de  $10\text{ mA}$  e que  $2V_{m\max} = 310\text{ V}$ ;  $V_{sm\min} = 109\text{ V}$ , tem-se que:

$$V_{ce1\text{m}\acute{a}\text{x}} > (300\text{V} - 109\text{V}) = 201\text{V}; \quad (24)$$

$$I_{c1\text{m}\acute{a}\text{x}} > 10 \text{ mA}; \quad (25)$$

$$P_{c1\text{m}\acute{a}\text{x}} > 201\text{V} \times 10 \text{ mA} = 2,01 \text{ W}. \quad (26)$$

Dessa maneira, o transistor BF458 foi escolhido para os 2 casos, visto que ele está dentro das especificaes exigidas para  $T_1$  ou  $T_2$ . Isto pode ser verificado comparando estas exigências com as suas ca racterísticas dadas na Tabela 3.

TABELA 3

PARÂMETROS ELÉTRICOS PRINCIPAIS DO TRANSISTOR BF458

Tipo	NPN
Tensão máxima de coletor-emissor ( $V_{ce\text{m}\acute{a}\text{x}}$ )	250 V
Corrente máxima de coletor ( $I_{c\text{m}\acute{a}\text{x}}$ )	100 mA
Ganho de corrente d.c. ( $h_{fe}$ ) mínimo	26
Tensão $V_{ce}$ de saturao	1 V com $\frac{I_c}{I_b} = 0,03/6$ (A/mA)
Potência máxima de coletor ( $P_{c\text{m}\acute{a}\text{x}}$ )	6 W
Frequência de corte ( $f_t$ )	90 MHz

Um potenciômetro de 100K $\Omega$ (1W) colocado na saída da fonte de polarização (ver Figura 5) controla a corrente de carga. Esta corrente deve ser no máximo de 10 mA, visto que a corrente de placa máxima permitida para a válvula 6AU6A é da ordem de 12 mA. É importante observar que a inserção deste potenciômetro no circuito faz com que a tensão  $V_s$  seja diferente da VAK, por causa da queda de tensão sobre o potenciômetro.

Dois medidores foram também introduzidos na fonte: um para medir a tensão  $V_s$  (250V no máximo) e outro para medir a corrente  $I_s$ . O medidor de corrente possui uma escala para medir correntes pequenas (até 1 mA) e outra para medir correntes maiores (até 10 mA).

Todos os resistores colocados na fonte, exceto  $R_s$ , são de 1/4 ou 1/8 W.

O ajuste fino da corrente de polarização é feito através do divisor de tensão colocado na saída da fonte de polarização conforme mostra a Figura 5, cuja função consiste em alterar minimamente o potencial de grade  $g_1$  (em relação ao catodo) da válvula 6AU6A para proceder à medição da corrente de íons de uma maneira correta (ver Seção 2.2).

## 2.2 - AMPLIFICADOR DE CORRENTE

O último estágio do circuito eletrônico do medidor compreende o amplificador de corrente cuja função consiste em amplificar a corrente de íons (centenas de  $\mu$ As) que chega ao coletor do sensor (ver Figura 2).

A Figura 6 mostra o amplificador de corrente com a sua fonte de alimentação.

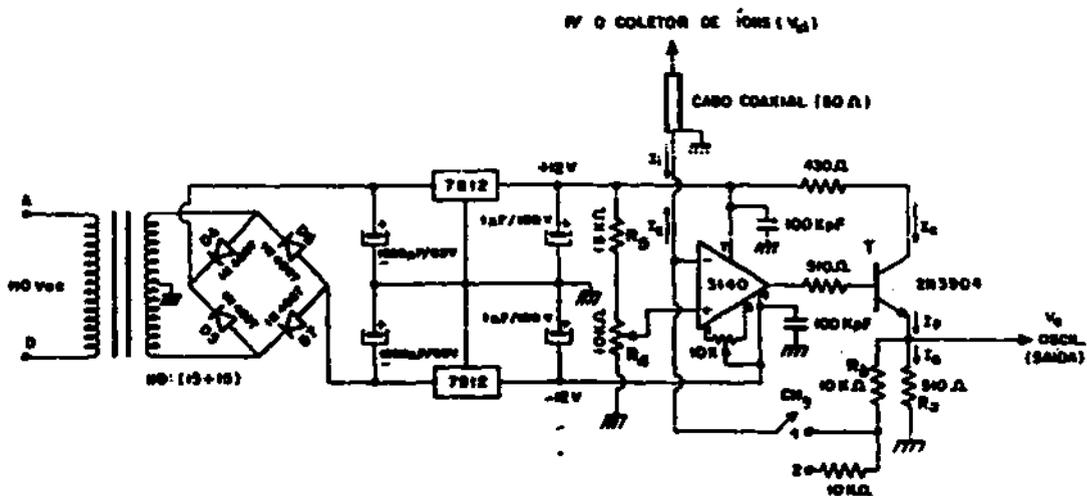


Fig. 6 - Amplificador de corrente.

O amplificador de corrente consiste basicamente num comparador diferencial (amplificador operacional 3140) e num estágio de saída do amplificador, cujo elemento principal é o transistor 2N3904.

A fonte de alimentação possui 2 saídas de tensão d.c. reguladas: +12 V e -12 V. O "center tap" do transformador da fonte é aterrado com a finalidade de obter estas 2 tensões de saída com polaridades opostas. Uma ponte com 4 diodos mais um filtro de saída (2 capacitores de 1000 µF/63 V) completam o sistema de retificação da fonte. A estabilização da tensão de saída é feita empregando 2 circuitos integrados, 7812 (polaridade positiva) e 7912 (polaridade negativa).

Quando o sensor está polarizado corretamente (fonte de polarização ligada e filamento da válvula aquecido), surge uma corrente de elétrons do catodo para o anodo (grade  $g_2$  da válvula 6AU6A), que é responsável pela ionização do gás que penetra no sensor. Esta corrente pode ser chamada de corrente de polarização.

Parte desta corrente pode atingir o coletor de íons, dependendo da diferença de potencial (d.d.p.) entre o coletor e o catodo.

Por exemplo, ajustando o potenciômetro de saída da fonte de polarização para uma tensão  $V_S$  de 180V e um potencial de grade  $g_1$  de 0V tal que a corrente de polarização seja de 2 mA, obtêm-se um potencial de cátodo medido experimentalmente de 2,66V. Neste caso, há uma corrente de elétrons que chega ao coletor de íons por ser a d.d.p. entre o coletor e o cátodo apenas da ordem -0,2 V, visto que o coletor se encontra a um potencial de 2,46 V em relação ao terra do sistema (ver Figura 6).

O potencial do pino 3 (entrada positiva) do operacional é igual a tensão de referência ( $V_r$ ) de 3,88V fornecida pelo divisor de tensão formado pelo potenciômetro  $R_4$  e pelo resistor  $R_5$ . Esta tensão de referência pode ser variada de 0 a 4,8V, aproximadamente. Como o pino 2 (entrada negativa) do operacional é ligado ao coletor, conforme mostra a Fig. 6, a tensão de saída do operacional (pino 6) tende a um valor próximo da saturação ( $\approx 10V$ ), pois o ganho de malha aberta do operacional é muito grande e a tensão diferencial na entrada ( $1,42V = 3,88V - 2,46V$ ) possui um valor relativamente alto. Neste caso, a tensão de saída do amplificador de corrente ( $V_a$ ) medida é de 7,36V. A corrente de elétrons que chega ao coletor de íons pode ser calculada através da seguinte equação:

$$I_E = \frac{(V_a - V_{Cf})}{R_b}, \quad (27)$$

onde:

$I_E$  = corrente de elétrons que chega ao coletor de íons;

$V_{Cf}$  = tensão do coletor de íons (ou pino 2 do operacional);

$R_b = R_1 + R_2$  (chave  $CH_2$  na posição 2) ou

$R_b = R_1$  (chave  $CH_2$  na posição 1).

Sabendo que, neste caso,  $V_a = 7,36V$ ;  $V_{Cf} = 2,46V$  e  $R_b = R_1 = 10K\Omega$ , calcula-se que:

$$I_E = \frac{(7,36V - 2,46V)}{10 K\Omega} = 0,49 \text{ mA}. \quad (28)$$

Variando o potencial de grade  $g_1$  para 19,2V, obtêm-se uma corrente de 2,3 mA para um potencial de catodo em relação à terra de 21,4V. Este aumento de corrente de polarização deve-se ao fato de que a d.d.p. entre a grade  $g_1$  e o catodo possui, agora, um valor menor (-2,2V) que anteriormente (-2,66V), isto é, o potencial de grade  $g_1$  em relação ao catodo tornou-se menos negativo. Entretanto, como o potencial do catodo de 21,4V é muito mais alto que o potencial do coletor de íons de 3,88V, não há nenhum fluxo de elétrons para o coletor, o que faz com que não haja circulação de corrente através do resistor  $R_b$  e, deste modo, obtêm-se que a tensão de saída do amplificador de corrente  $V_a$  é igual ao valor de tensão de referência  $V_r$ , pois sendo a tensão de entrada diferencial, neste caso, praticamente nula (tensão no pino 2 - tensão no pino 3 = 3,88V), o operacional não tende à saturação. Dessa maneira, a tensão de saída do operacional (pino 6) fica igual a  $V_r + V_{be} = 4,60V$  (valor medido experimentalmente; ver Figura 6).

Supondo que haja corrente de elétrons batendo no coletor, tem-se que a tensão  $V_a$  pode ser dada por:

$$V_a = V_r + R_b \times I_E = R_a \times I_a \quad (29)$$

onde:

$V_a$  = tensão de saída do amplificador de corrente;

$V_r$  = tensão de referência;

$R_a$  = resistor A de ganho;

$R_b$  = resistor B de ganho;

$I_E$  = corrente de elétrons que chega ao coletor de íons;

$I_a$  = corrente que circula através do resistor  $R_a$ .

Observando a Figura 6, verifica-se que a corrente de coletor do transistor pode ser escrita como:

$$I_c = I_e = I_a + I_E \quad (30)$$

onde:

$I_c$  = corrente de coletor do transistor T (2N3904);

$I_e$  = corrente de emissor do transistor T (2N3904).

Agora considerando o segundo caso onde não há circulação de corrente de elétrons ( $I_E = 0$ ) no coletor tem-se:

$$V_a = V_r = R_a I_a. \quad (31)$$

Para a corrente do coletor do transistor T, neste caso tem-se que:

$$I_c = I_e = I_a. \quad (32)$$

Quando ocorre o escape de gás, a frente de pressão atinge o sensor e os elétrons da corrente de polarização chocam-se com as moléculas do gás, ionizando-as. Dessa forma, a corrente iônica produzida atinge o coletor de íons do sensor e altera o equilíbrio das tensões e correntes de acordo com as seguintes equações para os 2 casos discutidos anteriormente:

$$V_a - \Delta V_a = V_r + R_b (I_E - I_f) = (I_a - \Delta I_a); \quad (33)$$

$$I_e = I_e = I_a + I_E - I_f; \quad (34)$$

$$V_a - \Delta V_a = V_r - R_b I_f = R_a (I_a - \Delta I_a); \quad (35)$$

$$I_c = I_e = I_a - I_f. \quad (36)$$

onde:

$I_f$  = corrente de íons que chega ao coletor;

$\Delta I_a$  = variação da corrente  $I_a$ ;

$\Delta V_a$  = variação de tensão  $V_a$ .

As Equações 33 e 34 representam o equilíbrio das tensões e de correntes no amplificador de corrente para o caso em que uma parte

dã corrente de polarização chega ao coletor de íons e as Equações 35 e 36 para o caso em que  $I_E = 0$  no coletor.

A partir das Equações 29 e 33 ou 31 e 35, calcula-se que:

$$-\Delta V_a = -R_b I_i = -R_a \Delta I_a. \quad (37)$$

A partir da Equação 37, calcula-se o ganho  $G$  do amplificador de corrente, pois a corrente de íons amplificada ( $I_i'$ ) é igual a variação da corrente  $I_a$  ( $I_i' = \Delta I_a$ ):

$$G = \frac{I_i'}{I_i} = R_b/R_a \quad (38)$$

Portanto, conclui-se que a amplificação da corrente de íons independe da corrente de elétrons que chega ao coletor de íons. A presença desta corrente eletrônica no amplificador de corrente pode ser evitada através do ajuste do potencial de grade  $g_1$  (ajuste fino da corrente de polarização), conforme já foi visto anteriormente. É aconselhável fazer as medidas com o SIR, tentar evitar o aparecimento desta corrente, porém a sua presença não invalida os resultados, já que o ganho  $G$  só depende de  $R_a$  e  $R_b$  (Equação 38).

Visto que o resistor  $R_b$  pode assumir 2 valores distintos (ver Figura 6), obtêm-se que o ganho  $G$  pode assumir 2 valores diferentes. Como  $R_b = 10\text{K}\Omega$  ou  $R_b = 20\text{K}\Omega$  e  $R_a = 510\ \Omega$ , tem-se que  $G$  pode assumir os seguintes valores:

$$G = \frac{10\ \text{K}\Omega}{510\ \Omega} \approx 20 \text{ (menor sensibilidade),} \quad (39)$$

ou

$$G = \frac{20\ \text{K}\Omega}{510\ \Omega} \approx 40 \text{ (maior sensibilidade).} \quad (40)$$

Finalmente, a variação de tensão de saída do amplificador ( $\Delta V_a$ ), que é proporcional à corrente de íons coletada pelo sensor,  $\bar{I}$

mostrada na tela de um osciloscópio de memória no modo a.c. A corrente de íons está relacionada com a quantidade de gás injetada pela válvula VIRG, isto é, com a variação de pressão interna ( $\Delta P$ ) na câmara de vácuo.

### 3 - CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR E CURVA DE CALIBRAÇÃO

A calibração do medidor foi feita com um fluxo contínuo de gás hélio (pressão estática) injetado na câmara de vácuo através da flange que faz a comunicação com o dispositivo CECI, com o sensor SIR colocado na posição 1 (ver Figura 1). A pressão estática do gás no interior da câmara foi variada através de uma válvula agulha. O sensor SIR foi calibrado com relação a medidores de vácuo do tipo Penning (para pressões  $< 10^{-2}$  Torr) e Pirani (para pressões  $> 10^{-2}$  Torr), de fabricação comercial, previamente calibrados no Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE. Para tanto, as pressões  $P$  lidas nos medidores padrão de resposta lenta e as tensões de saída do amplificador de corrente foram anotadas simultaneamente para diversos valores de pressão ajustados com a válvula agulha. As tensões  $V_a$  foram medidas através de um osciloscópio Tektronix da série 7400 (com memória na tela) no modo d.c. A corrente de polarização do sensor foi mantida em 2 mA. Plotando a pressão  $P$  versus a tensão  $V_a$ , obteve-se o gráfico da Figura 7.

O gráfico da Figura 7 permite a medida de pressão de pico de uma frente de gás que se propaga no interior de uma câmara de vácuo, através de um medidor de pressão de gás de resposta rápida, conforme será visto a seguir.

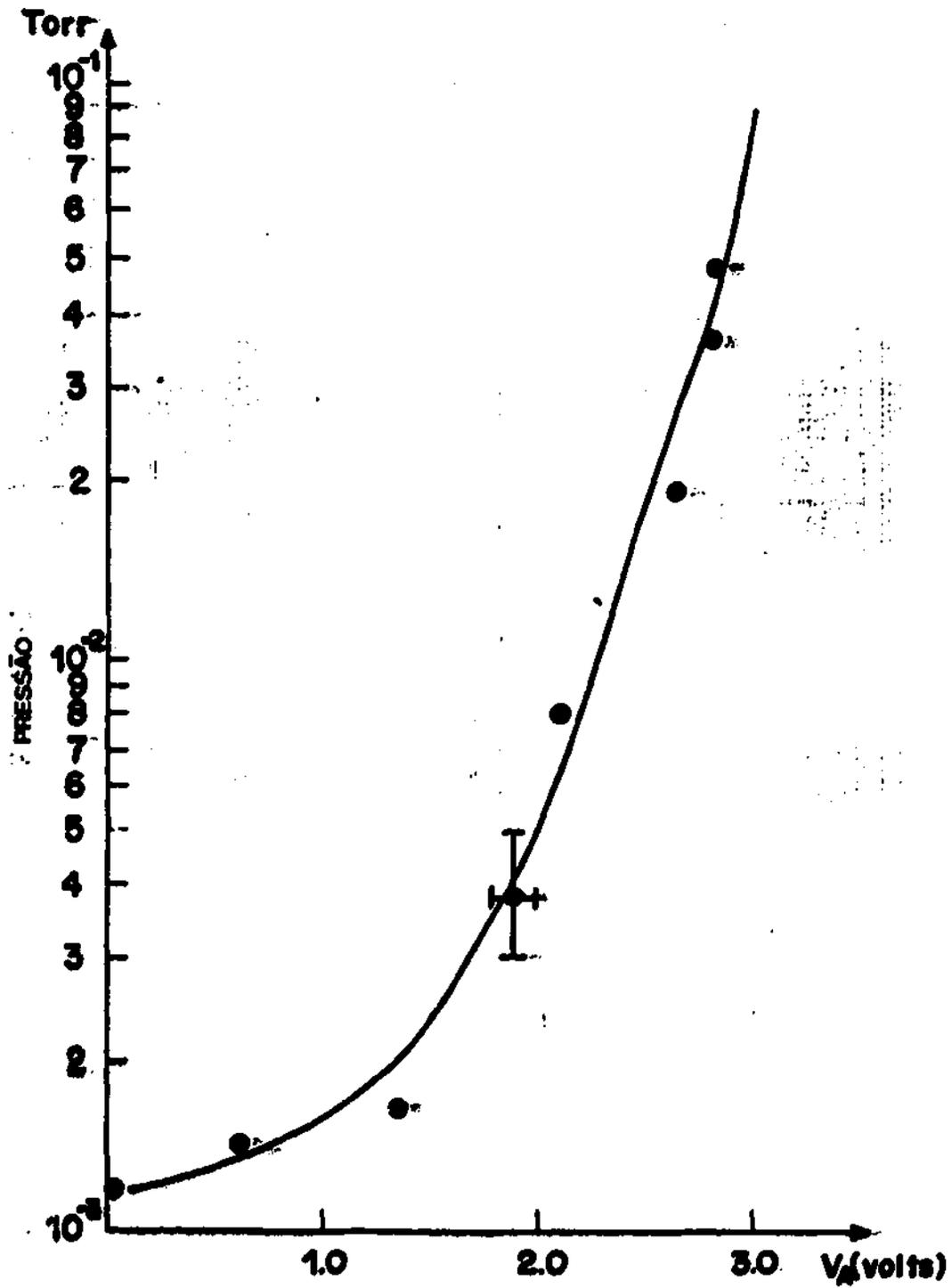
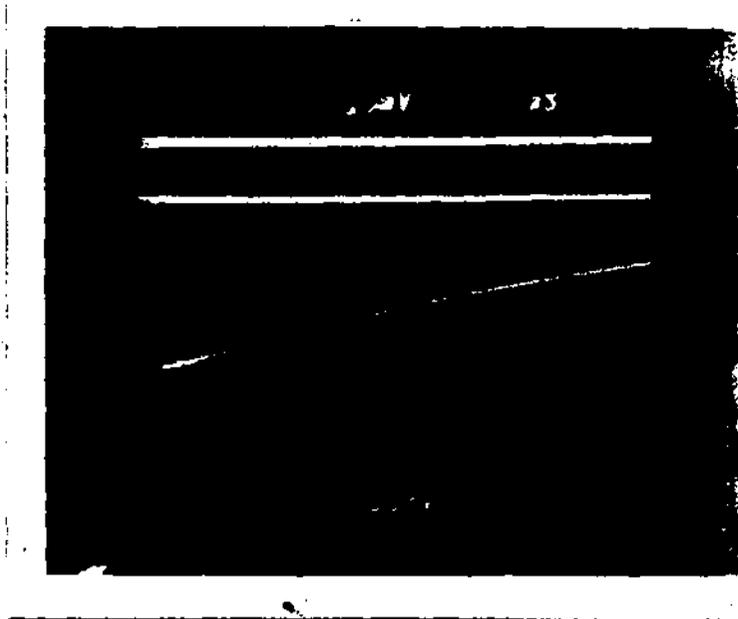


Fig. 7 - Curva de calibração do medidor.

#### 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CONCLUSÃO

As Figuras 8 e 9 mostram alguns dos resultados experimentais com o uso do medidor de resposta rápida.



a) Traço superior - corrente de descarga no solenóide da válvula VIRG.

Escala vertical: 10 mV/div.

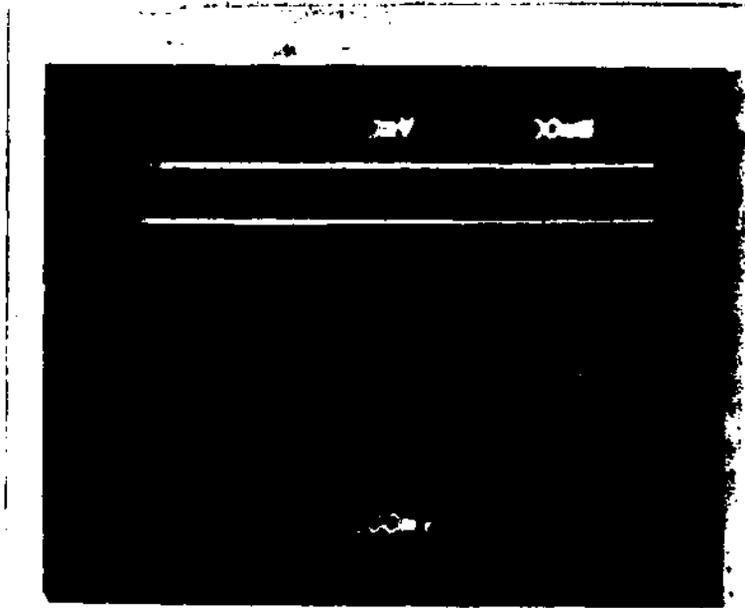
Escala horizontal: 2 ms/div.

b) Traço inferior - tensão de saída do amplificador de corrente ( $V_o$ ).  
Sensor colocado na posição 2. Tensão de carga do banco  $V_c = 5,8$  kV. Pressão de pico de 80 mTorr.

Escala vertical: 1 V/div.

Escala horizontal - 2 ms/div.

Fig. 8 - Sinais mostrados no osciloscópio de memória para caracterização da medida de pressão, (1ª condição).



a) Traço superior - corrente de descarga no solenóide da válvula VIRG.

Escala vertical: 10 mV/div.

Escala horizontal: 200  $\mu$ s/div.

b) Traço inferior à esquerda - tensão de saída do amplificador de corrente ( $V_a$ ) com tensão do banco  $V_c=3,6$  kV.  
Sensor colocado na posição 2.

Escala vertical: 1 V/div.

Escala horizontal: 200  $\mu$ s/div.

c) Traço inferior à direita - tensão de saída do amplificador de corrente ( $V_a$ ) com tensão do banco  $V_c=3,2$  kV.  
Sensor colocado na posição 2.

Escala vertical: 1 V/div.

Escala horizontal: 200  $\mu$ s/div.

Fig. 9 - Sinais mostrados no osciloscópio de memória para caracterização da medida de pressão (2ª condição).

As fotos foram obtidas com o osciloscópio no modo "storage", com o sensor colocado na posição 2 (ver Figura 1). Novamente, a corrente de polarização do sensor foi mantida em 2 mA.

A Figura 8 mostra 2 sinais: o sinal superior representa a corrente de descarga do banco de capacitores (medida com a bobina de Rogowski) que dispara a válvula VIRG para possibilitar o escape de gás; o sinal inferior representa a tensão de saída do amplificador de corrente, que é proporcional à variação de pressão da frente de gás que chega ao sensor. É sempre conveniente mostrar a corrente da bobina de Rogowski porque o osciloscópio é engatilhado no momento em que ocorre a descarga do banco de capacitores. A variação máxima da tensão de saída  $V_a$  obtida na Figura 8 é de aproximadamente 3,0V para uma tensão de carga do banco de capacitores ( $V_c$ ) da ordem de 3,8 kV. Entrando com este valor no gráfico da Figura 7, obtém-se um valor de 80 mTorr para a pressão de pico da frente de gás.

A Figura 9 mostra basicamente os mesmos sinais da Figura 8, mas a escala de tempo do osciloscópio foi expandida e a tensão de carga do banco foi variada. Isto possibilita tirar algumas conclusões sobre o tempo de resposta deste tipo de sistema. Nesta Figura, podem-se observar três sinais. O sinal superior representa, como anteriormente, a corrente da bobina de Rogowski. Os dois sinais inferiores representam as tensões de saída do amplificador de corrente, que fornecem o tempo de disparo da válvula VIRG. O sinal que apresenta uma tensão de pico maior (vale mais profundo) corresponde a uma tensão de carga  $V_c$  de 3,6 kV, enquanto o de pico menor corresponde a uma tensão  $V_c$  de 3,2 kV, aproximadamente. O sinal de amplitude maior possui um tempo de subida menor (da ordem de 400  $\mu$ s) que o de menor amplitude, donde se pode concluir que o tempo de resposta do sistema depende da tensão de carga do banco e, consequentemente, da válvula VIRG. Isto é facilmente explicado porque, para uma tensão de carga  $V_c$  maior, a válvula VIRG abre mais rapidamente e libera maior quantidade de gás. Sabe-se que o tempo de resposta de sistemas deste tipo pode ser menor que 20  $\mu$ s, baseado em resultados experimentais anteriores (Ueda, 1985). Os longos tempos de resposta obtidos no presente experimento devem-se provavelmente ao fato de o modo de propagação da frente de gás e de o tempo de abertura da válvula VIRG não estarem otimizados.

O atraso da tensão  $V_a$  medido com relação à corrente de descarga do banco (gatilho do osciloscópio), observado na Figura 9, ocorre devido ao tempo necessário para que a frente de gás percorra a distância entre a válvula VIRG e o sensor.

Em conclusão verifica-se que foi possível medir pressões de pico de 80 m Torr de um pulso de gás injetado no interior de uma câmara de vácuo por uma válvula de injeção rápida de gás (VIRG), com tempos da ordem de 400  $\mu$ s, usando para isso um medidor de resposta rápida (SIR) desenvolvido no LAP, previamente calibrado com medidores de vácuo de fabricação comercial do tipo Penning ou Pirani.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASO, Y.; GALVÃO, R.M.O.; UEDA, M. Design and operation of a small RFP for turbulent plasma studies. In: ENERGY INDEPENDENCE CONFERENCE ON FUSION ENERGY AND PLASMA PHYSICS, Rio de Janeiro, Brasil, Aug. 17-21, 1987. *Proceedings*. Singapore, World Scinetific, 1988, p. 122-132.
- PEDRON, P.D. *Proton ring trapping in a magnetic mirror*. Ph.D. Dissertation, Ithaca, N.Y., Cornell University, 1985.
- UEDA, M. *Intense Ion Beam from a magnetically insulated diode with anode source*. Ph.D. Dissertation, Ithaca, N.Y., 1985.
- UEDA, M.; ROSSI, J.O.; ASO, Y.; MANGUEIRA, L.S.; PEREIRA, C.A. *Construção e caracterização de uma válvula de injeção rápida de gás*. São José dos Campos, INPE, 1989. (INPE-4789-RPE/583).