



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 Otto Ludwig
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 PÁGS. / NO OF PAGES

32

ÚLTIMA PÁG. / 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 μ 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 μ 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.

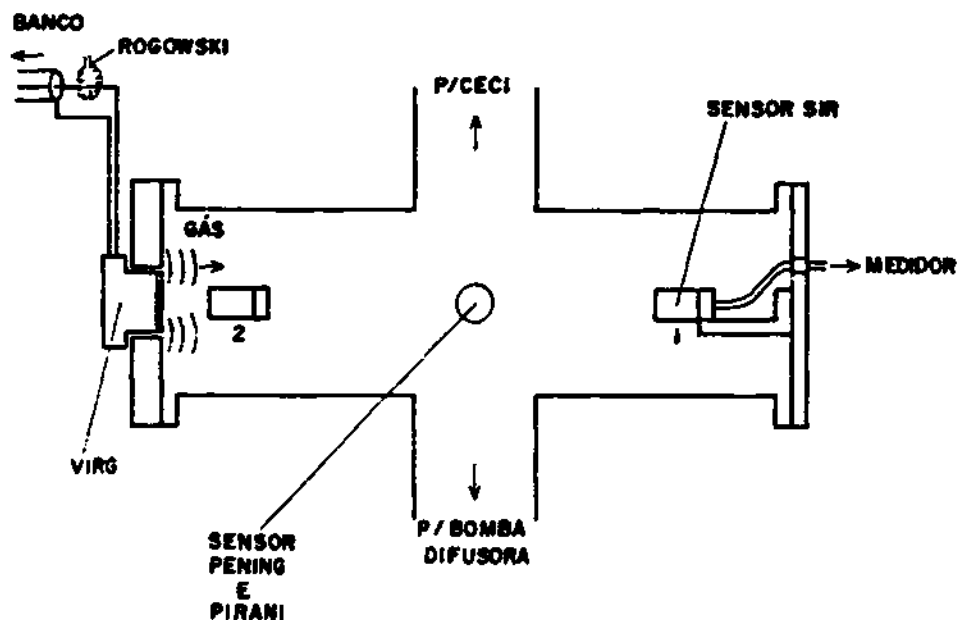


Fig. 1 - Esquema do sistema de medição da pressão de gás.

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.

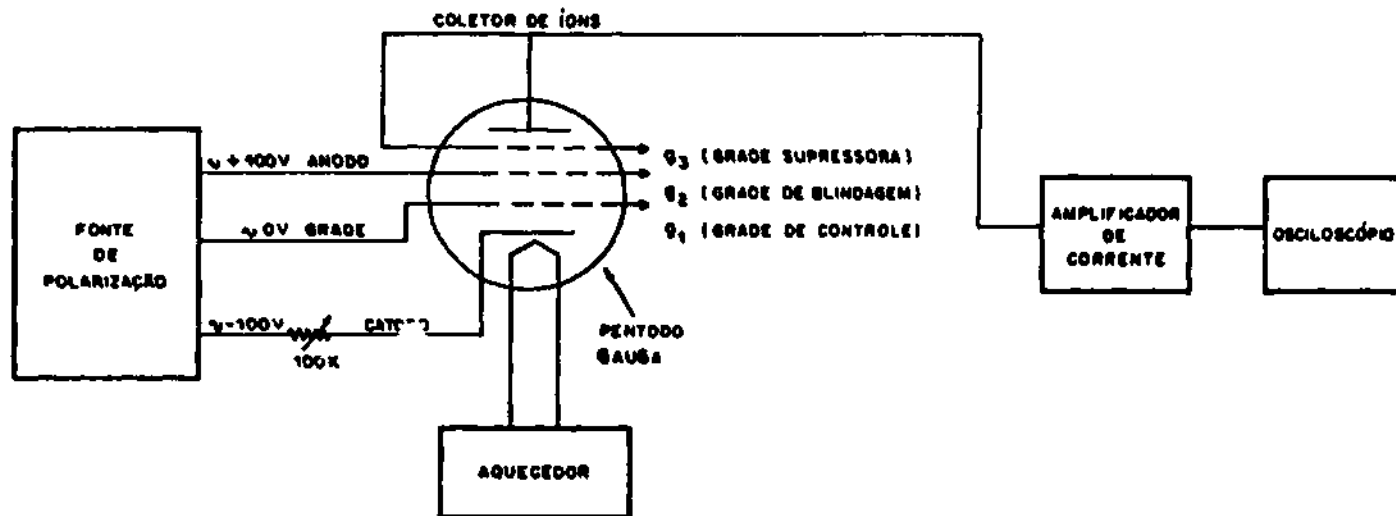


Fig. 2 - Diagrama de blocos do medidor de pressão de resposta rápida.

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

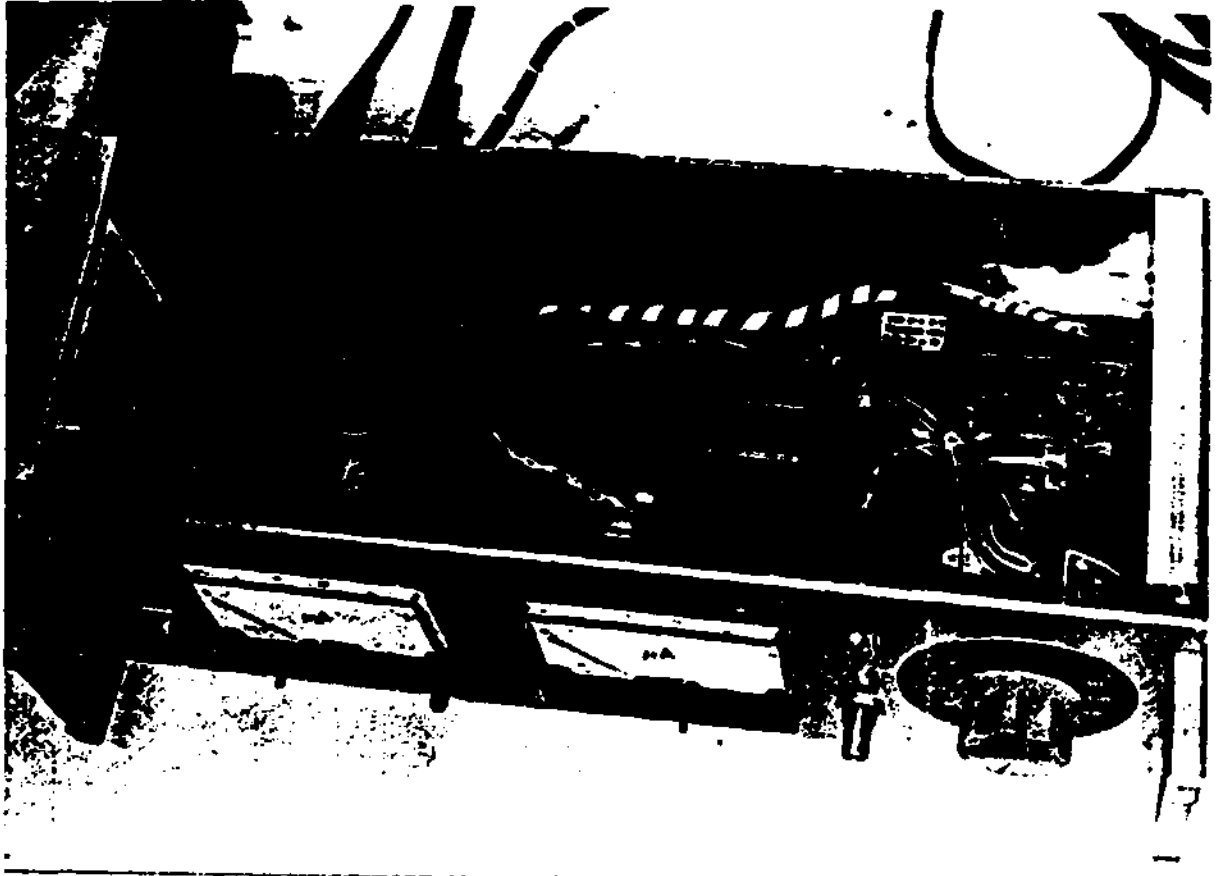


Fig. 3 - Fotografia do topo da caixa do circuito eletrônico do medidor do LAP.

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

CARACTERISTICAS 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 Ω
Transcondutância (g_m)	4800 μS
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.

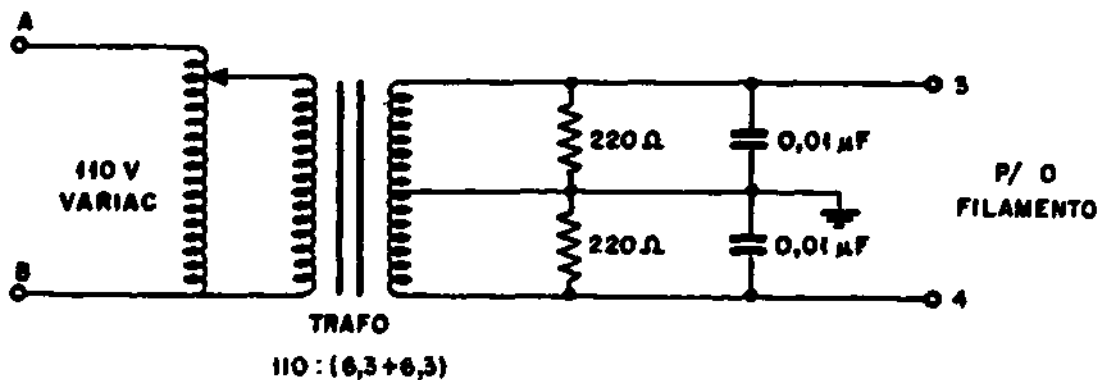


Fig. 4 - Aquecedor.

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.

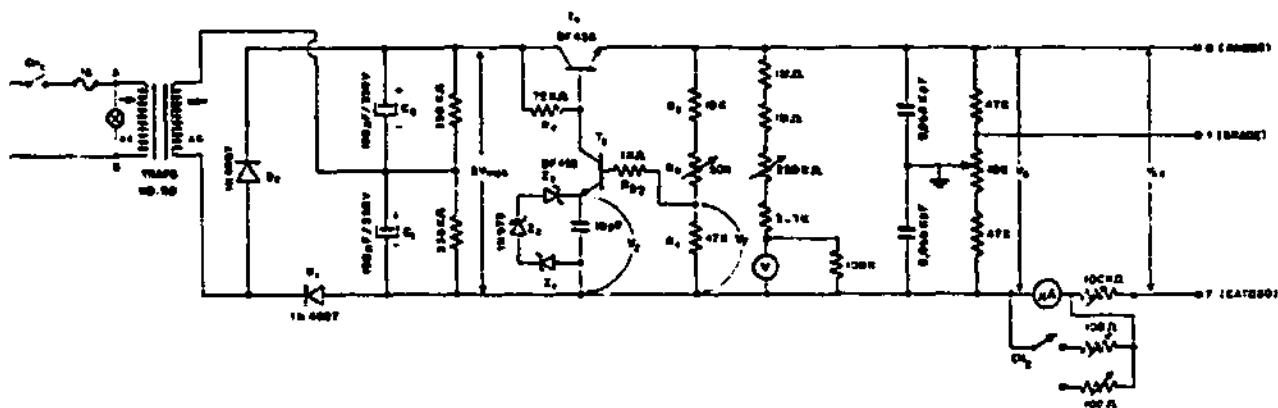


Fig. 5 - Fonte de polarização.

O duplicador de tensão funciona da seguinte maneira: quando a tensão de entrada é positiva (semiciclo positivo), o diodo D_1 está conduzindo e carregando o capacitor C_1 com o valor de pico da tensão de entrada ($V_{m\grave{a}x} = 155V$). Desta forma, o capacitor C_1 adquire a polaridade indicada na Figura 5. Ainda neste semiciclo, o diodo D_2 está cortado devido à polarização negativa do seu anodo. No momento em que a tensão de entrada passa ao semiciclo negativo, o diodo D_1 fica inversamente polarizado e pára de conduzir, passando o diodo D_2 à condução ao ficar diretamente polarizado. Portanto, C_2 fica carregado com o valor de pico da tensão de entrada, de acordo com a polaridade indicada na Figura 5. Dessa maneira tem-se $2V_{m\grave{a}x}$ (310V) na saída do duplicador de tensão. Como não há muito consumo de corrente, a tensão contínua de saída pode ser considerada como $2V_{m\grave{a}x}$, pois a fonte de polarização 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 equalização.

O circuito regulador s\u00e9rie consiste num sistema realimentado, no qual \u00e9 utilizado um elemento de controle (transistor T_1) que ir\u00e1 controlar a tens\u00e3o de sa\u00edda V_s , conforme mostra a Figura 5, a partir de uma tens\u00e3o de corre\u00e7\u00e3o enviada a ele atrav\u00e9s de um comparador. O transistor T_2 desempenha esta fun\u00e7\u00e3o, comparando uma tens\u00e3o de refer\u00eancia ($V_z =$ somat\u00f3ria das tens\u00f5es dos zeners z_1, z_2, z_3) com uma tens\u00e3o 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 μA), 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 mA e que $2V_{m\max} = 310\text{ V}$; $V_{sm\min} = 109\text{ V}$, tem-se que:

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

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

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

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 ($V_{ce\text{m}\acute{a}x}$)	250 V
Corrente máxima de coletor ($I_{c\text{m}\acute{a}x}$)	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 ($P_{c\text{m}\acute{a}x}$)	6 W
Frequência de corte (f_t)	90 MHz

Um potenciômetro de 100K Ω (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 μ As) que chega ao coletor do sensor (ver Figura 2).

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

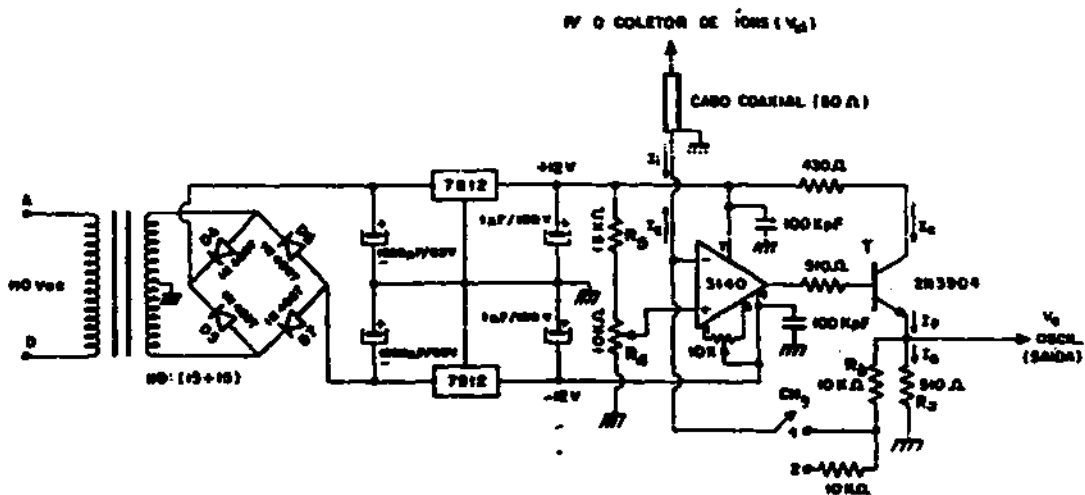


Fig. 6 - Amplificador de corrente.

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;

ΔI_a = variação da corrente I_a ;

ΔV_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 (ΔV_a), que é proporcional à corrente de íons coletada pelo sensor, é

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 (ΔP) 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.

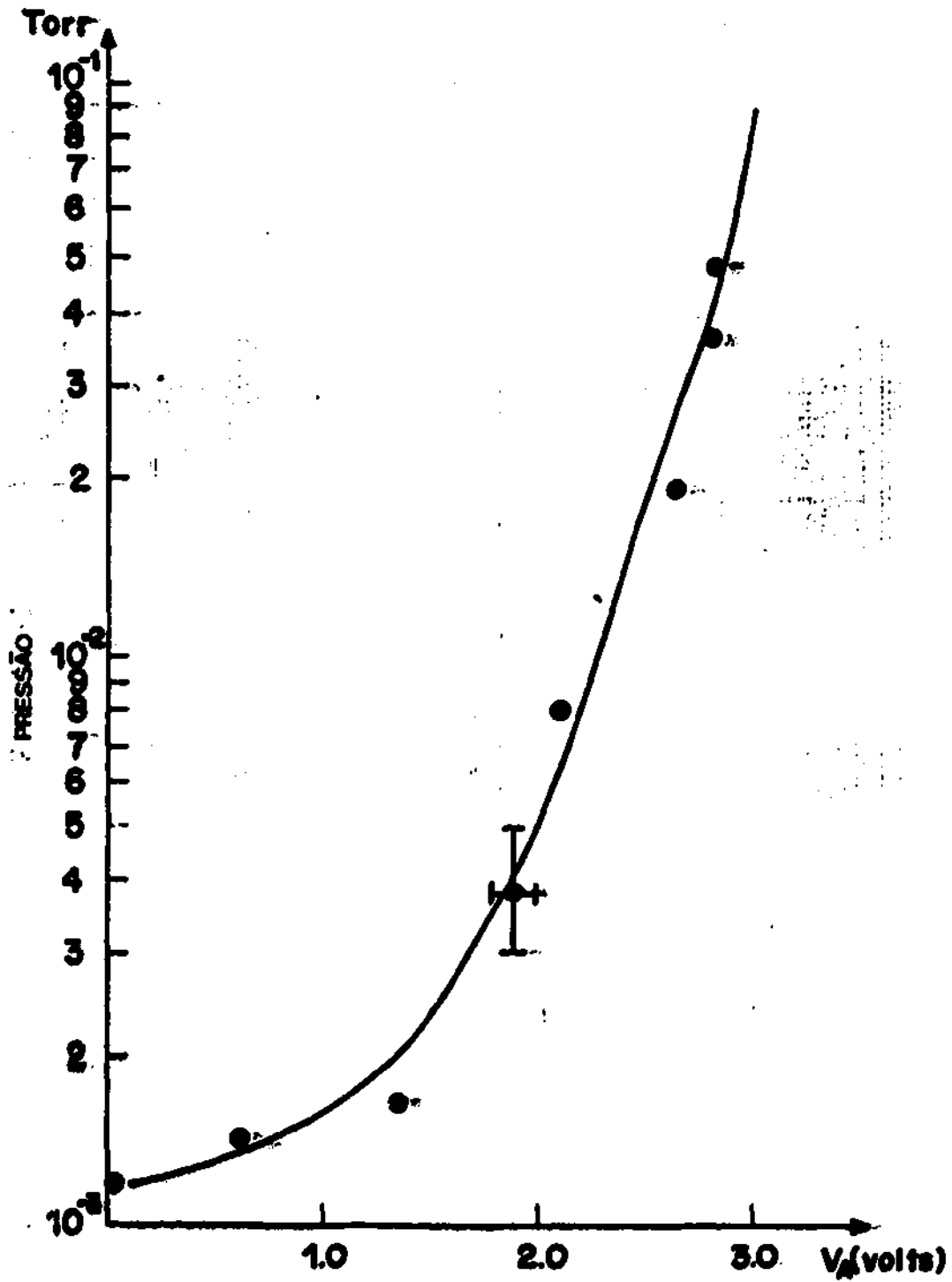
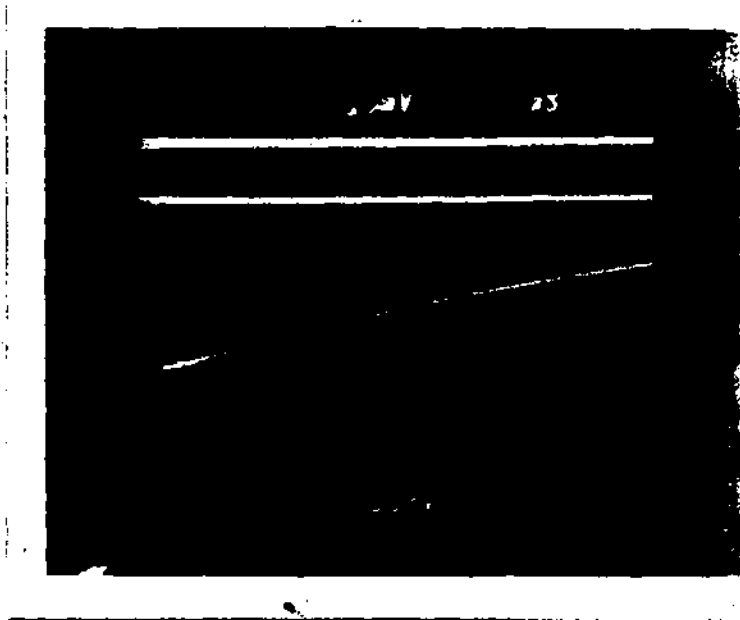


Fig. 7 - Curva de calibração do medidor.

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.

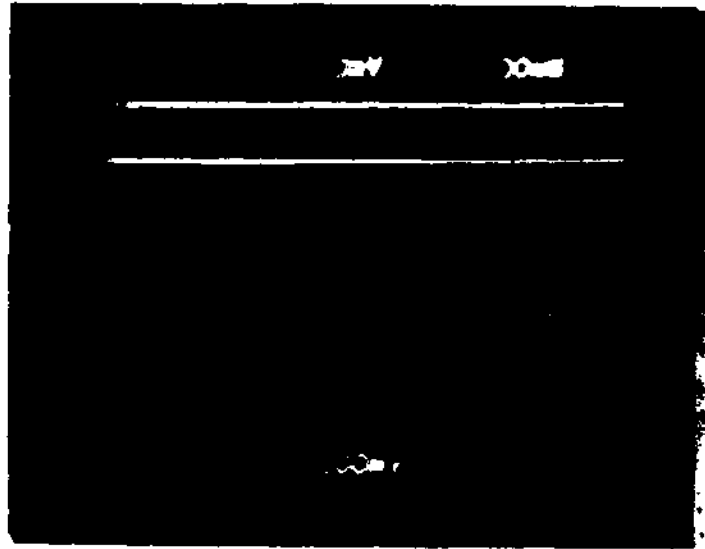
Escala horizontal: 2 ms/div.

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 μ 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 μ 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 μ 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 μ 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 μ 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 μ 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).