

DESENVOLVIMENTO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM

MANÔMETRO DE SAÍDA ELÉTRICA PARA O

CIRCUITO TÉRMICO Nº 1 DO IPR

FERNANDO LOBO VAZ DE MELLO

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES  
DA UFMG COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS

Orientador: JOÃO BOSCO DE SIQUEIRA

INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS

UFMG - CNEV

BELO HORIZONTE - MG - BRASIL

MAIO - 1971

A CONCEIÇÃO E AO ALEXANDRE

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Milton Campos, Diretor do Instituto de Pesquisas Radioativas, que permitiu o desenvolvimento desta tese dentro do seu programa.

Este trabalho foi realizado no Grupo de Medidas Físicas da Divisão de Ciências dos Materiais, como uma de minhas tarefas como engenheiro do Laboratório de Térmica da Divisão de Reatores. Exprimo aqui os meus a agradecimentos a seus chefes e colaboradores.

Meus agradecimentos se estendem também às seguintes pessoas :

Matemático Roberto A. Corrieri Moreira, pelos programas de computação desenvolvidos para este Trabalho.

Técnicos Geraldo Godinho Pinto, Elísio Jerken, Edson Conceição Resende e Eduardo Villani pela colaboração recebida na confecção dos diversos protótipos deste Trabalho.

Secretárias Neide Barra Reis e Catarina Maria de Pádua pelos serviços de dactilografia.

- IV -

Desenhista Alvaro Samartano Filho, pela confecção dos desenhos.

Prof. Geraldo Aurélio Cordeiro Tupinambá pelas proveitosas sugestões na elaboração desta tese.

Agradeço especialmente ao Prof. Arysio Nunes dos Santos pela valiosa e constante colaboração prestada durante o desenvolvimento deste Trabalho.

Agradeço ao Prof. João Bosco de Siqueira, pela sugestão ao assunto e valiosa orientação em todas as fases deste Trabalho.

São analisados os diversos tipos de manômetros quanto à sua aplicabilidade à medida de pressões de até 15 bar, juntamente com os transdutores eletromecânicos adequados à cada instrumento. Entre as diversas concepções aventadas foram desenvolvidos, projetados e construídos três protótipos : manômetro de tubo fechado, de fole com mola e de membrana espessa, sendo exposto o desempenho de cada um dos aparelhos. Pela verificação dos resultados obtidos, recomenda-se um manômetro de membrana espessa, usando um transdutor e acoplamento magnético variável como o instrumento mais apropriado ao trabalho proposto.

1. INTRODUÇÃO

2. TIPOS DE MANÔMETROS E SUAS CARACTERÍSTICAS

2.1. Manômetros com transdutores primários mecânicos

2.2. Manômetros que utilizam transdutores primários elétricos

3. TRANSDUTORES ELETROMECÂNICOS CONVENCIONAIS

3.1. "Strain Gauge"

3.2. Resistência variável

3.3. Efeito piezoelétrico

3.4. Resistência variável

3.5. Transformador diferencial

6

4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

4.1. Manômetro de tubo fechado

4.2. Manômetro de fole

4.3. Manômetro de membrana espessa

5. DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS PROPOSTOS

- 5.1. Manômetro de fole com mola
- 5.2. Manômetro de membrana espessa

6. RESULTADOS OBTIDOS E SUA ANÁLISE

- 6.1. Equipamento utilizado
- 6.2. Manômetro de fole
- 6.3. Manômetro de membrana espessa
- 6.4. Comparação dos instrumentos

7. CONCLUSÃO

8. BIBLIOGRAFIA

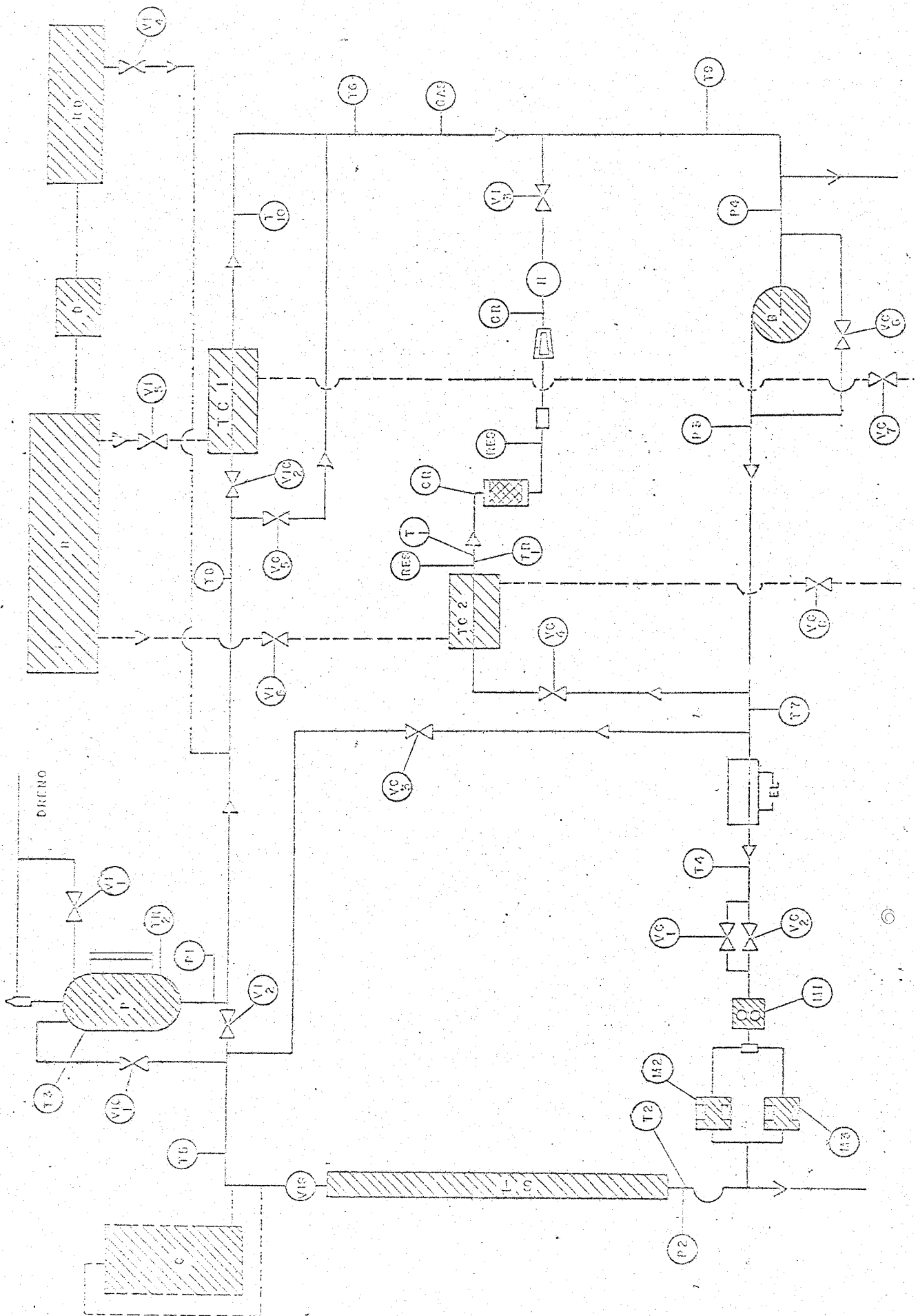
## 1. INTRODUÇÃO

Há algum tempo vem o Instituto de Pesquisas Radiativas, por intermédio de sua Divisão de Reatores, estudando os diversos problemas relacionados com a tecnologia de projeto e construção de reatores nucleares. Entre estes problemas estão principalmente os pertinentes à física de nêutrons e à térmica de reatores. Para atender à parte experimental destes tópicos, estão em fase de construção e conclusão os Laboratórios de Neutronics e de Térmica, respectivamente. No Laboratório de Térmica será instalado o Circuito Térmico nº 1, destinado ao estudo dos parâmetros relacionados com a transferência de calor. Este circuito servirá como base para estudos e projeto de circuitos de maior porte e complexidade, com a finalidade de análise e simulação de problemas relacionados com a térmica de reatores.

Consta este circuito basicamente de uma resistência elétrica com geometrias variadas que dissipa uma potência de até 350 kw, refrigerada a água pressurizada com circulação forçada, conforme mostra a figura 1.1. A água de refrigeração circula com uma vazão máxima de 5 l/s, sendo admissível que sua temperatura atinja até 200 °C à pressão máxima nominal de 18 bar. Para minimizar o efeito da corrosão sobre os diversos componentes do circuito, a água será continuamente desionizada, evitando-se seu funciona-







ESQUEMA DO CIRCUITO TÉRMICO Nº 1

(FIG-1.1)

*Alvaro*

mento quando a resistividade estiver abaixo de  $1 \text{ M } \Omega \text{ cm}$ .

Ao longo deste circuito diversos parâmetros serão medidos e controlados, tais como, temperatura, pressão, vazão, etc. No início do projeto, tinha-se o propósito de executar a instrumentação, tanto quanto possível no Instituto de Pesquisas Radioativas, com a finalidade de se formar e treinar uma equipe destinada à medição de grandezas térmicas. Considerando a data prevista para funcionamento do Circuito Térmico nº 1, e que o pessoal capacitado à confecção de sua instrumentação já estava envolvido em outros trabalhos, o projeto inicial ficou restrito a alguns instrumentos, entre eles um manômetro destinado a medida de pressões absolutas da água refrigerante do circuito. O presente trabalho descreve o desenvolvimento de tal instrumento.

Ao iniciar-se o projeto construtivo do aparelho, foram fixados 4 pontos :

- 1) Levando-se em conta as condições de funcionamento previstas do circuito, foi determinado que o alcance do instrumento seria de 5 a 15 bar.
- 2) Em virtude da facilidade de manipulação oferecida, o sinal de saída do manômetro deveria ser elétrico; além disto, este sinal deveria ser normalmente usado em registradores convencionais.
- 3) A precisão do instrumento deveria ser igual ou melhor que 5% do valor médio da escala ( $\sim \pm 0,5 \text{ bar}$ ).
- 4) Tanto a tecnologia quanto os materiais empregados, deveriam ser facilmente acessíveis ao Instituto de Pesquisas Radioativas e, além disto, o projeto apresentado seria susceptível de ser modificado para outras gamas de pressão.

O presente trabalho foi dividido nas seguintes partes para sua apresentação :

- Tipos de manômetros e suas características
- Transdutores eletromecânicos convencionais
- Descrição dos instrumentos propostos
- Desenvolvimento do projeto
- Resultados obtidos e sua análise
- Conclusão

Foi adotado como unidade de pressão o bar, conforme recomendado pelo Decreto nº 53 233 de 12/9/1968.

$$1 \text{ bar} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 1/1,033 \text{ atmosfera.}$$

## 2. TIPOS DE MANÔMETROS E SUAS CARACTERÍSTICAS

A medição da pressão é das mais utilizadas no campo da técnica em virtude do grande número de outros parâmetros que podem ser determinados por seu intermédio. Através da pressão podem ser medidas grandezas tais como, temperatura, vazão, níveis, etc.

Para que esta variedade de parâmetros fosse medida através da pressão, desenvolveu-se grande número de manômetros, diferindo tanto no que diz respeito ao tipo, quanto à capacidade e alcance.

Serão examinados a seguir, os tipos de manômetros mais comuns, considerando-se sua possível aplicabilidade ao projeto proposto. Os tipos serão divididos em duas classes, conforme seus transdutores primários sejam elétricos ou mecânicos.

### 2.1. Manômetros com transdutores primários mecânicos

2.1.1. Manômetro de tubo U aberto ou diferencial

2.1.2. Manômetro de tubo U fechado

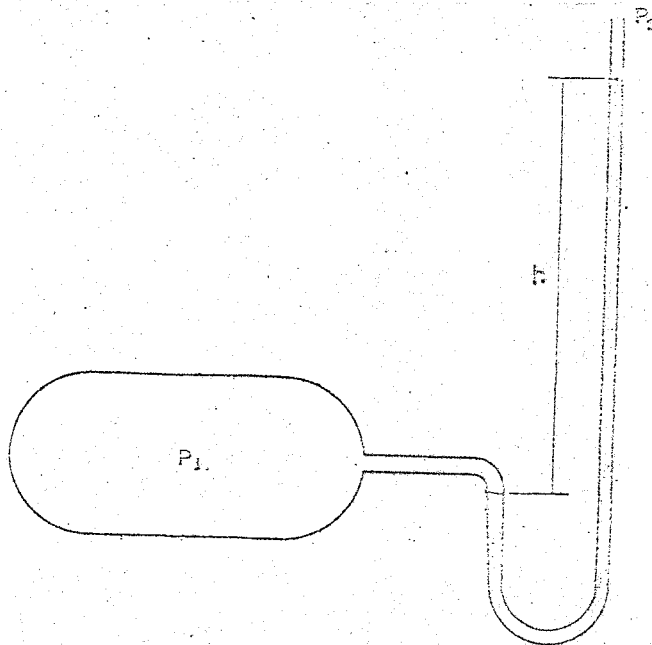
2.1.3. Manômetro de membrana

2.1.4. Manômetro de fole com mola

2.1.5. Manômetro de Bourdon

2.1.1. Manômetro de tubo U aberto ou diferencial

A diferença de pressão aplicada neste tipo de manômetro abaixa o nível do líquido em um ramo, enquanto no outro, o nível do líquido sobe. A diferença de pressão é lida diretamente pela altura entre os dois níveis, conforme mostra a figura 2.1.



MANÔMETRO DE TUBO ABERTO

(FIG-2.1)

A pressão diferencial é dada por

$$P_1 - P_2 = h \rho g \quad (2.1)$$

onde

- $\rho$  - densidade média do líquido
- $h$  - diferença de altura entre os dois níveis
- $g$  - aceleração da gravidade

Os fatores a serem considerados no cálculo da densidade média do líquido dependem da precisão exigida pela medida, sendo alguns deles discutidos nos parágrafos seguintes.

Todo líquido, quando sujeito a diferentes pressões, sofre maior ou menor variação de densidade, causada por sua compressibilidade. Portanto, numa coluna o líquido tem densidade variável com sua altura. Esta variação será mais acentuada nos líquidos mais densos e compressíveis, aumentando também com a altura do líquido.

Outro fator é a influência da temperatura na densidade de um líquido. Naturalmente, um aumento de temperatura que traz como consequência um aumento de volume, diminuirá a densidade do líquido, aumentando a altura da coluna para uma dada pressão. ⑥

Para se reduzir a evaporação do líquido no ramo aberto, são utilizadas tubos com diâmetros reduzidos. Esta redução pode causar dificuldades na leitura da altura em virtude do efeito da tensão superficial (capilaridade).

A oscilação da massa líquida em torno da sua posição de equilíbrio, pode tornar a leitura do instrumento bastante trabalhosa. Normalmente são feitos alguns estrangulamentos no tubo para se evitar este fenômeno.

embora dêste modo se aumente o tempo de resposta do instrumento.

Uma das maiores limitações dêste tipo de aparelho é seu alcance; pois a diferença de pressão aplicada é proporcional à altura entre os dois níveis.

Para a utilização de um manômetro de tubo aberto neste projeto necessitar-se-ia de uma pressão de referência. Além disso o comprimento do tubo deveria ser aproximadamente 8 m, utilizando-se um líquido tão denso como o mercúrio, o que tornaria bastante incômodo seu manuseio. A altura poderia ser reduzida pelo uso de vários manômetros em série, o que tornaria o ajuste e a leitura bastante trabalhosos.

#### 2.1.2. Manômetro de tubo U fechado

Este manômetro difere do anterior, pois o gás contido no seu ramo fechado exerce uma pressão que é comparada à pressão medida, conforme mostrado na figura 2.2. Considerando que o manômetro funciona à temperatura constante :

$$P_a = P_i + h \rho g$$

onde

$P_a$  = pressão aplicada

$P_i$  = pressão do gás ou vapor contido no ramo fechado correspondente ao volume  $V_i$

$h$  = diferença de altura da coluna

$\rho$  = densidade média do líquido

$g$  = aceleração da gravidade

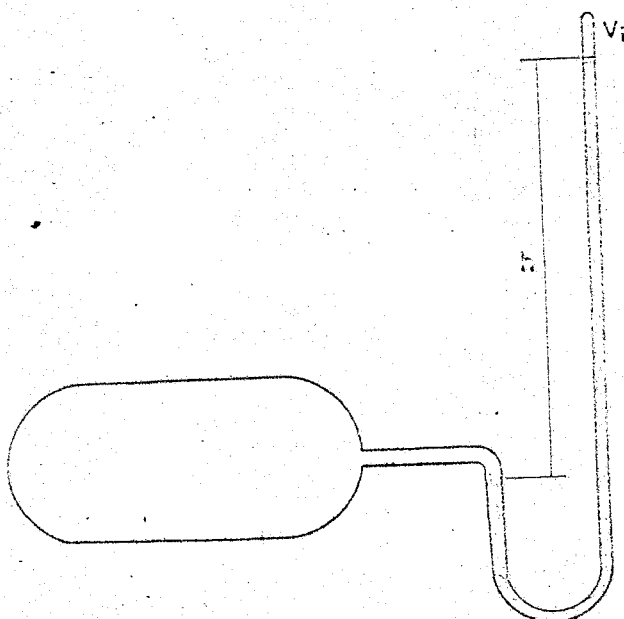
Pela lei de Boyle :



$$P_i V_i = K$$

$$P_a = h \rho g + K/V_i \quad (2.2)$$

Sendo K constante.



MANÔMETRO DE TUBO FECHADO  
(FIG-2.2)

©

Além dos problemas referentes à precisão do instrumento anteriormente citados, outros fatores influem nas medidas com ele executadas. O principal é causado pela utilização de um gás não ideal, cuja miscibilidade no líquido seja variável com a pressão. Além disto, qualquer variação de temperatura alteraria de vários modos as medidas feitas. Uma das vantagens deste tipo de manômetros é o maior alcance do instrumento quando comparado com um de mesmas dimensões de

tubo aberto.

Nos instrumentos para medida de pressões pequenas, a menor pressão mensurável é limitada apenas pela pressão de vapor do fluido utilizado. No campo das altas pressões, o alcance máximo do instrumento é limitado pelo seu projeto mecânico. Com um projeto ortorioso, consegue-se expansão das escalas de medidas em regiões escolhidas pela simples colocação de câmaras no instrumento.

Como será visto adiante, foi tentada a aplicação deste tipo de instrumento ao trabalho proposto, pois seu princípio de funcionamento e alcances podem ser perfeitamente adaptados a ele.

### 2.1.3. Manômetro de membrana

Os manômetros de membrana podem ser classificados em dois tipos; um para medida de pressões diferenciais e outro para medida de pressões absolutas.

O tipo destinado à medidas de pressões diferenciais é constituído fundamentalmente por uma membrana metálica flexível. As duas pressões cuja diferença se quer determinar são aplicadas às faces opostas da membrana empurrando-a contra uma mola cuja compressão é medida. Este tipo de manômetro é empregado quando o uso do manômetro de tubo aberto é inadequado, ou pela impossibilidade de se evitar o contato entre os fluidos cuja pressão está sendo medida com o líquido do manômetro, ou pela grande diferença de pressão existente.

No manômetro de membrana para medidas de pressões absolutas, a pressão a ser medida é aplicada a uma placa circular com os bordos engastados. Quando a pressão é aplicada, há um encurvamento da placa e pode-se determinar o valor da pressão pelo deslocamento do

centro da placa,

O deslocamento do centro de uma membrana circular uniformemente carregada e com as bordas engastadas é dado pela equação [ 18 ] .

$$\delta = 0,58 \frac{\delta^3}{h^2} = \frac{3 p a^2 (1-\mu^2)}{16 E h^3} \quad (2.3)$$

onde

$\delta$  = deslocamento do centro da membrana

$h$  = espessura da membrana

$p$  = pressão aplicada

$a$  = raio da membrana

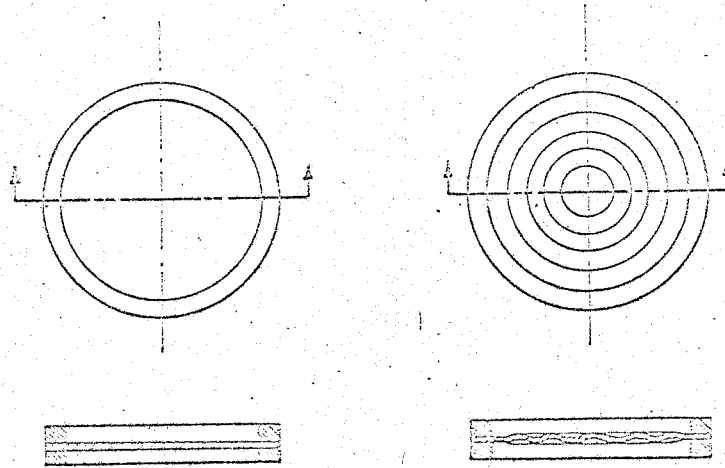
$\mu$  = coeficiente de Poisson

$E$  = módulo de elasticidade

Como se deseja que o afundamento central da membrana seja proporcional à pressão aplicada, deve-se fazer com que

$$\delta \gg \frac{0,58 \delta^3}{h^2} \quad (2.4)$$

Admitindo uma não linearidade de 1%, o deslocamento central da membrana ficará limitado a 0,131 de sua espessura. A rigidez mecânica das membranas espessas faz com que suas flechas sejam reduzidas. Nas membranas finas, embora a condição de linearidade impeça grandes flechas, pode-se obter deslocamentos maiores com mesma linearidade quando se utilizam membranas corrugadas, conforme pode ser visto na figura 2.3. Os fenômenos causados por dilatações diferenciais entre a membrana e a caixa do instrumento podem ser desprezados quando é utilizado um único material na confecção de todo o aparelho.



## TIPOS DE MEMBRANAS

(FIG-2.3)

Alguns transdutores secundários empregados neste tipo de manômetro são acoplados ao centro da membrana. O emprêgo de molas também é feito algumas vêzes com a finalidade de aumentar o campo de medida do instrumento. Estas adaptações, na maioria das vêzes, exigem um reforço da parte central da membrana, reduzindo sua flexibilidade e dificultando seu cálculo teórico.

Em virtude dos inúmeros fatores que não podem ser previstos, não se deve esperar resultados precisos quando se calcula teoricamente um manômetro de membrana. Entre estes fatores podem ser citados a rigidez dos anéis externos de fixação da placa, que não permite um engastamento tão bom quanto o teoricamente previsto, e as propriedades físicas do material constituinte da placa, que dificilmente são conhecidas com precisão. Por este motivo torna-se indispensável a

calibração do instrumento após sua confecção, para se obterem medi-  
das confiáveis.

#### 2.1.4. Manômetro de fole com mola

Neste tipo de instrumento a pressão exercida no interior de  
um fole flexível é equilibrada pela compressão de uma mola, confor-  
me mostra a figura 2.4.

Considerando-se o sistema em equilíbrio

$$\Delta P X S = \Delta L X K \quad (2.3)$$

onde

$\Delta P$  = variação de pressão em torno de uma pressão de refe-  
rência.

$\Delta L$  = deslocamento

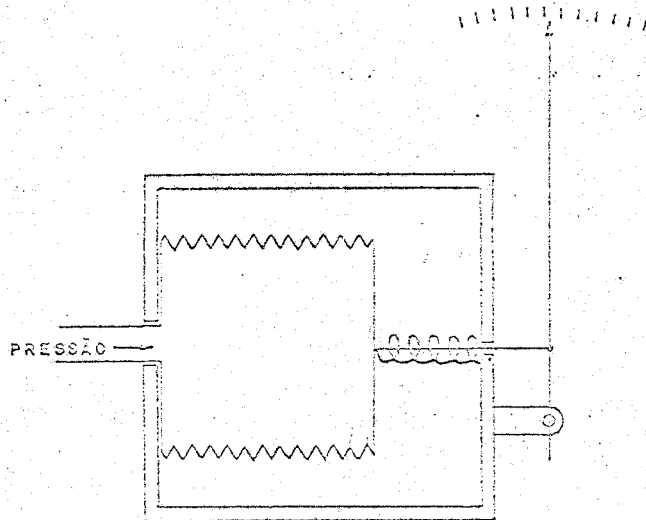
$S$  = seção de fole

$K$  = constante da mola

Aplicando-se o mesmo princípio, pode-se construir aparelhos  
destinados à medida de pressões diferenciais. ©

A grande vantagem deste tipo de manômetro é seu alcance ajustável pela escolha da mola. Vê-se pela equação 2.3, que uma seleção criteriosa dos componentes deste tipo de instrumento permite que o mesmo tenha aplicabilidade para diversos alcances da escala, bastando apenas o uso de molas com constantes diferentes.

Embora seu princípio de funcionamento seja bastante simples, a construção prática deste tipo de instrumento exige componentes bem selecionados para se evitar imprecisões em sua indicação.



MANÔMETRO DE FOLE  
(FIG-2.4)

As molas empregadas devem introduzir pouca histerese no sistema e os foles, para serem considerados ideais, devem ter uma elasticidade tal que torne sua histerese desprezível.

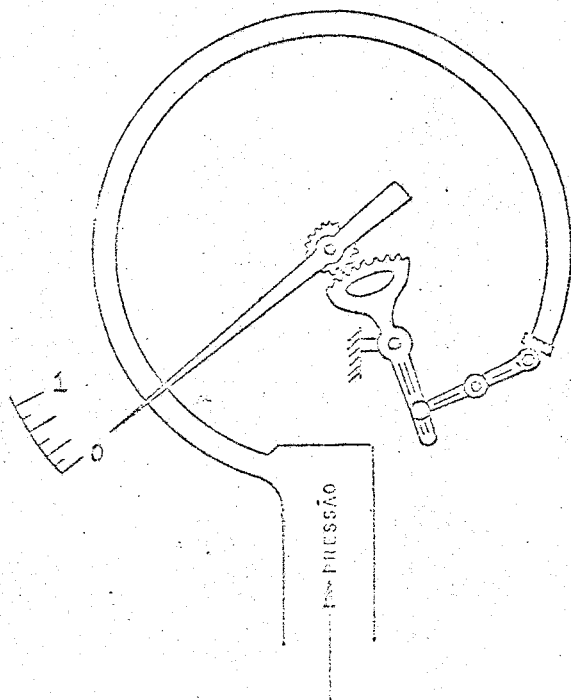
O processo de leitura do deslocamento também deve ser escolhido com bastante cuidado. A simples fricção de um ponteiro indicador sobre uma escala ou de um pino guia do fole pode causar indicações falsas, em virtude de seu atrito agir contra o posicionamento ideal da mola. A histerese e flutuações de zero são algumas das maiores fontes de erro deste tipo de instrumento.

Considerando os pontos acima, um manômetro deste tipo foi

utilizado como um dos protótipos, o que será visto nos capítulos posteriores.

#### 2.1.5. Manômetro de Bourdon .

É dos tipos de manômetros mais antigos e baseia-se na distensão de um tubo oval espiralado causada por um aumento de pressão interna. O deslocamento da extremidade livre do tubo é transmitido, por meio de um mecanismo de relojoaria, a um ponteiro sobre um dial onde é feita a leitura, conforme mostrado na figura 2.5.



MANÔMETRO DE BOURDON

( FIG - 2.5 )

Para evitar quaisquer imprecisões, o sistema de relojoaria é feito de tal forma que o atrito e a histerese sejam mínimos. Como este mecanismo é de difícil construção, exigindo tecnologia apropriada, a confecção deste tipo de manômetro foi julgada inadequada. Outros fatores considerados nesta decisão foram, respectivamente, a impossibilidade de se prever teoricamente o funcionamento do instrumento e a possível imprecisão na transdução do sinal de saída. Deste modo, seria necessário a construção de alguns protótipos até se chegar ao modelo mais adequado. A transdução de um sinal mecânico representado por um pequeno arco circular é bastante delicada no que tange à precisão e histerese, principalmente pela introdução de mecanismos de relojoaria aí necessários. Entretanto a transdução poderia ser feita com "strain gauge", o que eliminaria estes inconvenientes. Mas, como exposto adiante, o "strain gauge" requer eletrônica bastante elaborada e foi por isto excluído.

## 2.2. Manômetros que utilizam transdutores primários elétricos

### 2.2.1. Manômetro de Pirani

### 2.2.2. Manômetro por termopares

### 2.2.3. Manômetro por ionização causada por filamentos aquecidos

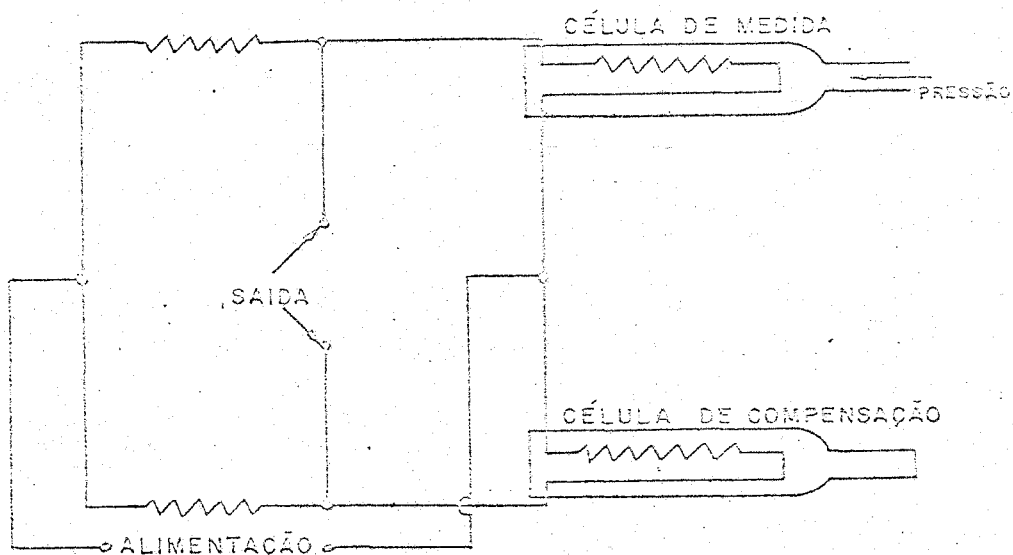
### 2.2.4. Manômetro por ionização causada por fonte radioativa

### 2.2.1. Manômetro de Pirani

O diagrama esquemático do medidor de Pirani está na figura 2.6. Essencialmente é uma ponte de Wheatstone alimentada por uma fonte regulada, que fornece potência constante à célula de medida e à célula de referência. A pressão na célula de referência é reduzida.



para cerca de 1 micron de mercúrio. O calor aí dissipado é transmitido somente por radiação ou através dos terminais de alimentação. Embora a potência dissipada na célula de medida seja a mesma, o calor aí pode ser transmitido por condução e convecção do gás no seu interior, além dos processos de dissipação que ocorrem na célula de referência. Como a potência fornecida às duas células é a mesma, a temperatura mais baixa ocasionará uma queda da resistência da célula de medida, desequilibrando a ponte.

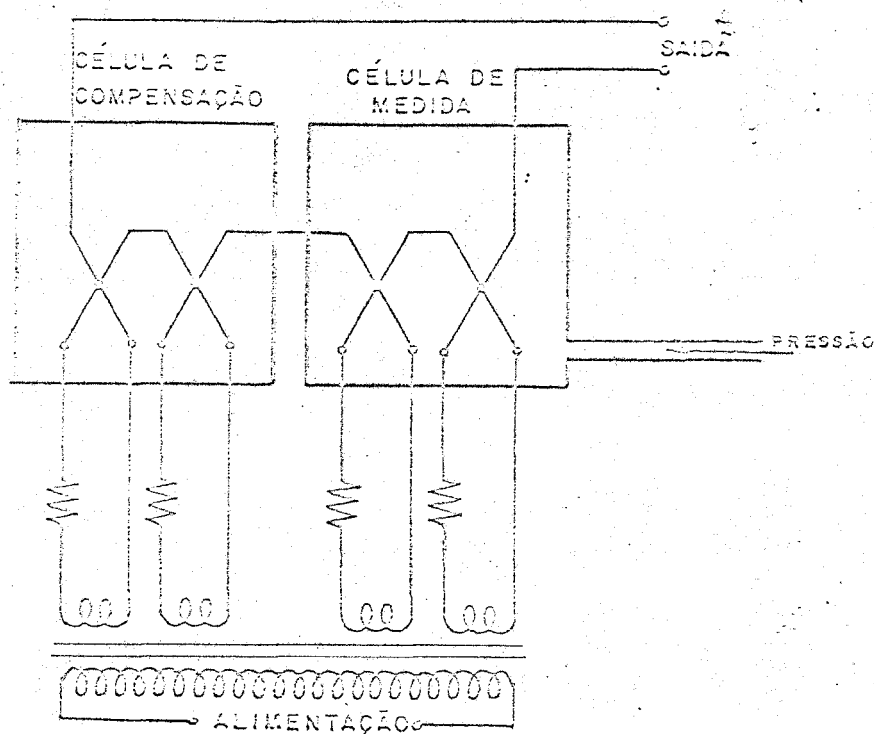


MANÔMETRO DE PIRANI  
(FIG-2.6)

Embora a célula de Pirani seja bem simples, sua aferição e calibração são bastante trabalhosas em virtude de sua saída variar de acordo com o gás cuja pressão está sendo medida. Normalmente este tipo de instrumento é usado para pressões abaixo de 1 mm de mercúrio, pois só então sua sensibilidade torna-se adequada.

### 2.2.2. Manômetro por termopares

Seu princípio de funcionamento é bastante semelhante ao manômetro de Pirani : duas resistências, uma colocada numa célula onde foi feito vácuo como referência, e outra numa célula onde a pressão está sendo medida, conforme mostrado na figura 2.7.



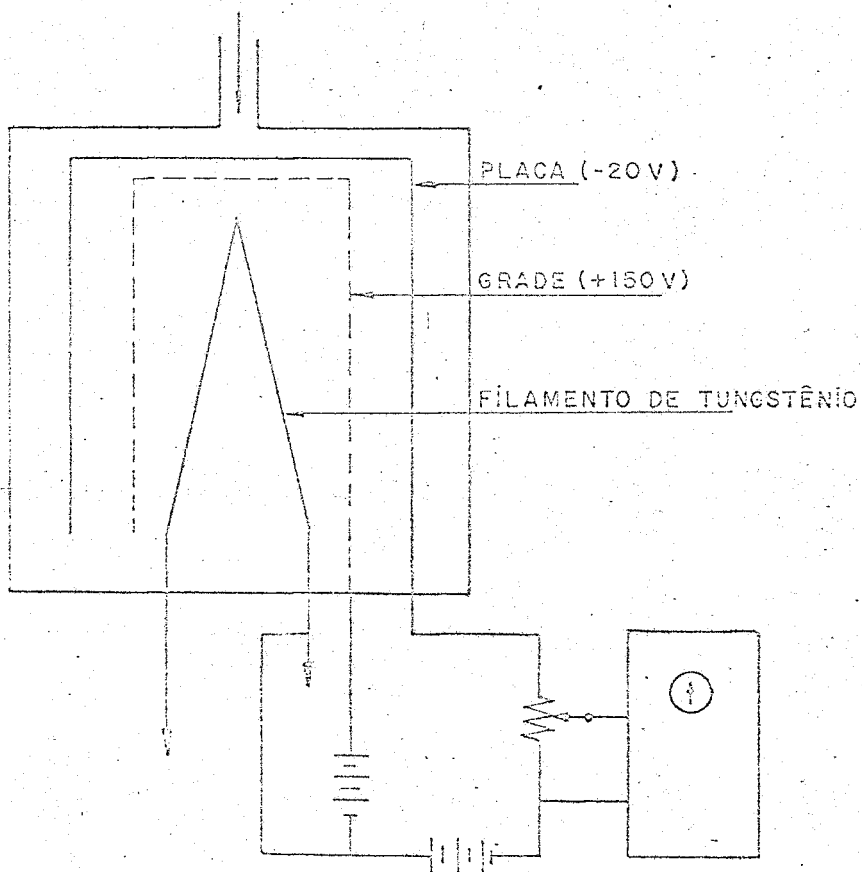
MANÔMETRO DE TERMOPARES  
( FIG-2.7 )

Como a potência fornecida a ambas resistências é idêntica, haverá uma diferença de temperatura entre elas, que é medida por dois termopares ligados em oposição.

Tanto as qualidades quanto o alcance de medida deste instrumento são análogos ao de Pirani.

### 2.2.3. Manômetro de ionização por filamento

Este tipo de instrumento é bastante semelhante ao triodo amplificador a vácuo. Na figura 2.8. estão indicados seus principais elementos com as tensões usuais nele utilizadas.



MANÔMETRO DE IONIZAÇÃO POR FILAMENTO  
(FIG-2.8)

A alta voltagem da grade acelera os elétrons emitidos pelo filamento, fazendo com que estes ionizem o gás aí existente. Os íons positivos serão atraídos pela placa negativa, cuja corrente indica a que pressão está submetido o conjunto.

O campo de medida deste instrumento varia de  $5 \times 10^{-4}$  a 10 micron de mercúrio.

O maior inconveniente deste tipo de manômetro refere-se ao envelhecimento do filamento e sua possível oxidação, os quais introduz erros nas medidas obtidas.

#### 2.2.4. Manômetro de ionização por radiação

Para evitar os problemas causados pelo envelhecimento e oxidação do filamento do item anterior, este pode ser substituído por uma fonte radioativa de partículas alfa.

No medidor, utilizando partículas alfa, a energia por elas fornecida é bem menor que no caso do filamento aquecido. Conseqüentemente sua sensibilidade é também menor, embora a ausência dos problemas relacionados com o envelhecimento do filamento permita que sua precisão seja bem maior.

### 3. TRANSDUTORES ELETROMECÂNICOS CONVENCIONAIS

A dificuldade inerente ao manejo e transmissão de um sinal mecânico aliado à facilidade com que a informação elétrica pode ser manipulada são as causas principais da frequente utilização de transdutores eletromecânicos. Um transdutor eletromecânico pode ser definido como sendo um dispositivo que, recebendo uma excitação mecânica, fornece um sinal elétrico que é função da excitação.

As características mais importantes que definem a qualidade de um transdutor são precisão, repetibilidade, histerese e linearidade .

Serão descritos a seguir os principais tipos de transdutores eletromecânicos empregados para medidas de pressão, classificados pelo princípio físico que empregam.

- 1) "Strain gauge"
- 2) Resistência variável
- 3) Efeito Piezoelétrico
- 4) Resistência variável
- 5) Acoplamento magnético variável

### 3.1. "Strain gauge"

A resistência elétrica de um condutor a temperatura constante, é proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à sua seção. O estiramento do condutor no sentido longitudinal aumentará o seu comprimento, diminuindo sua seção.

Denominando  $R$  a resistência apresentada por um fio de comprimento  $L$  e seção circular de raio  $r$ , cujo material tem resistividade  $\rho$  :

$$R = \frac{L \rho}{\pi r^2}$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{2 dr}{r}$$

$$\frac{dr}{r} = -\frac{dL}{L} \mu$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} (1 + 2\mu)$$

onde  $\mu$  é o coeficiente de Poisson, aproximadamente 0,3 para os metais.

Segundo Bridgman

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V}$$

onde

$C$  = constante

$V$  = volume do condutor

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} \left[ 1 + 2\mu + C(1-2\mu) \right]$$

$$\frac{dR}{R} = G \frac{dL}{L} \quad (3.1)$$

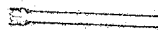
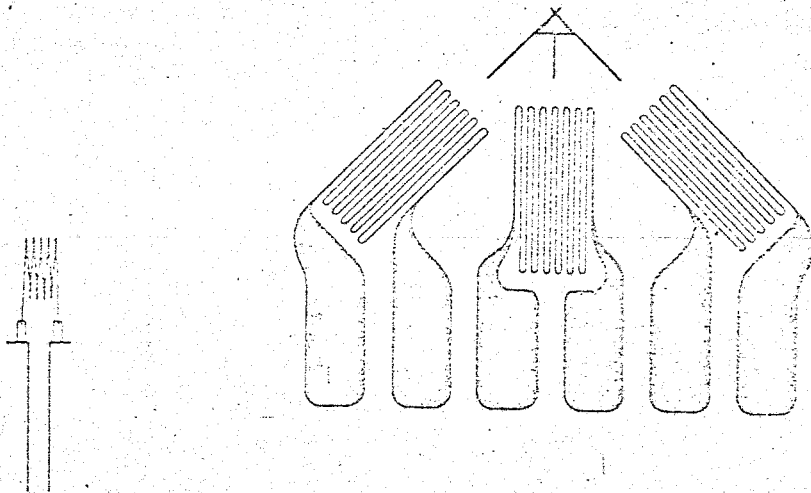
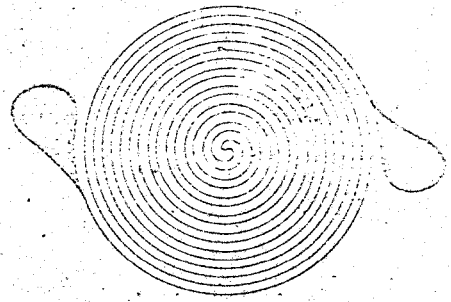
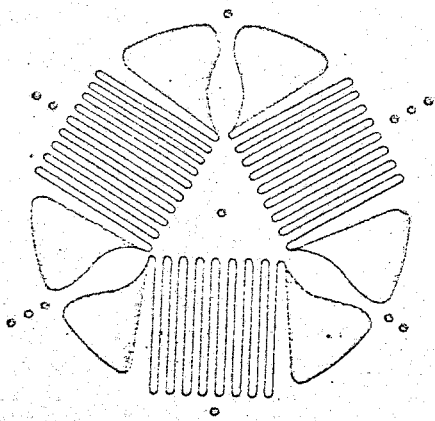
G = fator de "gauge"

Dêste modo, o aumento da resistência apresentado pelo condutor é proporcional ao seu aumento de comprimento. Embora os valores de G variem de -12 para o níquel a 5,1 para a platina iridiada [5], unidades comerciais têm em geral G entre 1,9 e 2,1 [12].

Teóricamente o condutor empregado pode ter qualquer tamanho ou forma, mas, na prática, certas geometrias como as mostradas na figura 3.1. são mais adequadas. Estes tipos de transdutores são constituídos por uma base flexível isolante à qual é fixado o condutor. A base é colada intimamente à peça cuja deformação está sendo medida a fim de transmiti-la ao condutor, alterando assim sua resistência. Normalmente, como materiais condutores são mais usadas ligas de níquel e cobre, embora sejam também utilizadas ligas de ferro, molibdênio, manganês e cromo.

As desvantagens deste transdutor são o baixo sinal de saída, dependência da temperatura e a flutuação com o tempo.

O baixo sinal de saída é causado pelo pequeno alongamento normalmente permitido ao material condutor. Embora admita-se um acréscimo relativo de comprimento de até  $5 \times 10^{-3}$  para aplicabilidade da equação 3.1., um aumento acima de  $3 \times 10^{-3}$  já faz com que seja bastante difícil que o condutor retorne à sua condição inicial. Considerando os estiramentos permissíveis e os G máximos, deduz-se que a variação da resistência pode atingir valores relativos de até  $10^{-2}$ , sendo usualmente empregadas variações da ordem de  $4 \times 10^{-3}$ .



CONFIGURAÇÕES DO "STRAIN GAUGE"

(FIG. - 3.1)



A variação de temperatura afeta a medida dos deslocamentos de dois modos : pela variação da resistividade do material condutor e pela possível dilatação diferencial entre o fio e o material suporte. Estas variações podem introduzir erros relativos de até  $10^{-4}$ , contudo uma escolha criteriosa permite que estes sejam inferiores a  $10^{-5}$ .

Na ausência de corrosão, o envelhecimento do condutor do "strain gauge" causa uma variação desprezível no valor de sua resistência; entretanto o envelhecimento da cola produz deslocamentos da base sobre o fio, introduzindo erros bastante grosseiros.

A maior dificuldade no uso do "strain gauge", advém da pequena variação do valor da resistência com o deslocamento, exigindo portanto equipamentos de medida bastante elaborados.

Como a variação máxima relativa da resistência é  $4 \times 10^{-3}$ , para se obter uma precisão na medida dos deslocamentos relativos da ordem de  $10^{-3}$ , seriam necessárias uma estabilidade do ponto de equilíbrio de cerca de  $10^{-6}$  e medidas de voltagens da ordem de microvolts, conforme será mostrado no capítulo 4. A utilização de equipamento com esta precisão em ambientes normais já é bastante crítica no que concerne a relação sinal/ruído. Se for considerado que no Circuito Térmico nº 1 haverá retificação com posterior filtragem de correntes da ordem de  $8 \times 10^{-3}$  A, a utilização de equipamento com tal precisão é totalmente desaconselhada, especialmente tendo-se em conta o tipo de regulação por SDR, que causa considerável interferência de rádio frequência. Embora a substituição de um "strain gauge" convencional por um do estado sólido aumente o valor de variação da resistência de cerca de 200 vezes, a instabilidade com a temperatura e a não linearidade de sua resposta introduzem problemas adicionais para medida de deslocamentos, quando se deseja que estes produzam uma resposta linear.

Problemas adicionais tais como flutuações devido à deformação permanente do condutor, desliramento devido a defeitos de colagem, ataques quím-

miços no fio e na cola causados pela umidade ambiental e a necessidade de cada "strain gauge" requerer calibração individual, devido às variações de  $\epsilon$ , além de sua importação aliada a um alto custo de elaboração local da eletrônica a ele associada, tornam este tipo de transdutor desaconselhável para medidas de faixas variadas que possam ser facilmente produzidos no Instituto de Pesquisas Radiativas, a baixo custo.

### 3.2. Reatância variável

A transdução eletromecânica por reatância variável é feita pela variação da permeabilidade magnética do núcleo dos indutores ou pela variação das dimensões ou da constante dielétrica nos capacitores.

#### 3.2.1. Transdução a indutância variável

Considerando-se um indutor fisicamente indeformável, o único meio de se variar sua indutância é através do seu circuito magnético. Como o ferro e algumas de suas ligas têm uma permeabilidade magnética de cerca de 10.000 vezes maior que a do ar, substituindo-se um núcleo de ar por um de ferro num indutor, sua indutância será substancialmente alterada.

O valor de um indutor formado por uma simples camada de espiras é dado, conforme mostra a figura 3.2. por :

$$L = \frac{4 \pi^2 N^2 r_0^2}{l_0} K$$

onde

$N$  = número de espiras

$r_0$  = raio do indutor

$l_0$  = comprimento do indutor

$K$  = coeficiente de Nagasaka

Se o núcleo de ar for substituído por um de permeabilidade magnética  $\mu$ , raio  $r_2$  e com comprimento  $l_0$ , o novo valor do indutor será

$$L_1 = K \frac{4\pi^2 N^2}{l_0} (r_0^2 + \mu r_1^2 - r_1^2)$$

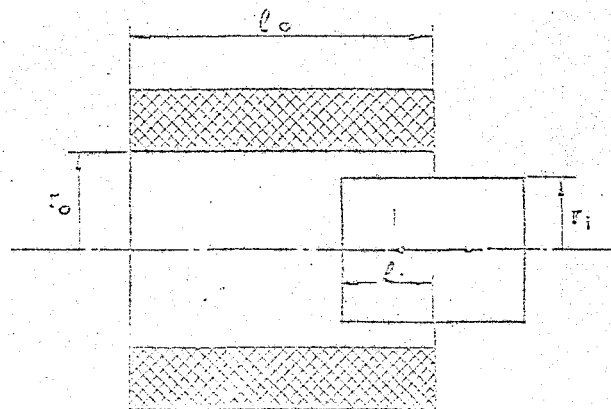
Considerando agora o comprimento do núcleo de permeabilidade  $\mu$  igual a  $l$ , sendo

$$l < l_0$$

o valor do indutor será

$$L_2 = \frac{K 4\pi^2 N^2}{l_0} \left[ l_0 r_0^2 + l(\mu - 1)r_1^2 \right] \quad (3.2)$$

Pela equação 3.2. vê-se a existência de uma relação linear entre o comprimento do núcleo de permeabilidade mais alta e o valor da indutância da bobina.



INDUTOR COM NÚCLEO MÓVEL

(FIG-3.2)

Quando um indutor é usado como transdutor eletromecânico, a excitação mecânica é acoplada ao núcleo ferro-magnético da bobina, de tal forma que o valor de sua indutância seja alterado.

### 3.2.2. Transdução a capacitância variável

A fórmula da capacitância entre duas placas planas e paralelas é dada por

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

onde

A = área das placas

d = distância entre as placas

$\epsilon$  = constante de permissividade do dielétrico

Deste modo, qualquer movimento que varie a área comum às placas ou a distância entre as mesmas altera o valor da capacitância. Outra maneira de se alterar a capacitância apresentada seria pela variação do tipo ou da área do material dielétrico contido entre as placas. Com exceção do método de afastamento das placas, os outros dois métodos de variação da capacitância são lineares com sua excitação. ©

A grande vantagem do transdutor a resistência variável é sua alta linearidade e resolução infinita. A leitura do valor do elemento é, em geral, feita por uma ponte de Wheatstone. Indiretamente o valor do elemento pode ser determinado utilizando-o como circuito tanque de um oscilador cuja frequência é medida. O problema da utilização destes transdutores é a dificuldade em se obter uma saída elétrica linearmente dependente da excitação mecânica.

### 3.3. Efeito piezoeletrico

Certos materiais possuem a propriedade de gerar diferenças de potencial, quando sujeitos a deformações mecânicas. Entre estes materiais estão o quartzo, sal Rochelle, titanato de bário polarizado, fosfato dihidrogenado de amônio, turmalina, etc.

Nenhum dos materiais que apresentam o efeito piezoeletrico possui todas as propriedades desejáveis para seu emprego, como, estabilidade; alto sinal de saída, insensibilidade à umidade e temperatura e capacidade de ser obtido em qualquer geometria. O quartzo, embora seja o mais estável, apresenta sinal de saída bastante pequeno; o sal Rochelle embora apresente um sinal de saída maior, não pode ser usado acima de 50 °C e deve ser protegido contra a umidade. O titanato de bário é semelhante a um material cerâmico policristalino, insensível à umidade, e pode ser obtido em qualquer forma física, embora exija prévia polarização. A alta estabilidade do quartzo possibilita seu uso em osciladores eletrônicos para controle de frequência.

A utilização dos elementos piezoeletricos em transdutores é feita principalmente em medidas dinâmicas, visto que o potencial gerado não é mantido em condições estáticas.

### 3.4. Resistência variável

Este tipo de transdutor é composto por um contato elétrico deslizante sobre um resistor, que converte assim uma excitação mecânica em uma saída elétrica (potenciômetro).

O resistor pode ser feito com um simples fio esticado, ou com um fio enrolado de forma espiralada ou simplesmente depositando-se uma camada do material resistivo sobre uma base isolante. O arranjo físico pode ser feito de tal forma que se tenha um dispositivo para detecção de movimentos retilíneos ou angulares.

Um modelo do tipo potenciômetro para detecção de movimentos angulares é o potenciômetro de giro múltiplo, possibilitando dezenas de voltas. Tais potenciômetros são feitos de modo a introduzirem uma quantidade mínima de atrito no sistema.

O tipo de potenciômetro mais usado é o linear, isto é, sua saída é proporcional ao sinal de entrada, embora algumas aplicações exijam potenciômetros não lineares.

Problemas associados a este transdutor são muitos, devido ao contato do cursor, influência de sujeiras, instabilidade, etc., além da dificuldade de se construir um potenciômetro com boa resolução e pequena folga.

### 3.5. Transformador diferencial

Um tipo de transdutor eletromecânico dos mais utilizados é o transformador diferencial, que fornece uma tensão de saída alternada, proporcional ao deslocamento de um núcleo ferromagnético no interior de seus enrolamentos, feitos com 3 bobinas de eixo comum. Na figura 3.3. estão mostradas as diversas disposições possíveis normalmente utilizadas no transdutor. A bobina primária é energizada, enquanto as duas bobinas secundárias, idênticas, são ligadas em oposição de fase. A tensão de saída é uma função do acoplamento entre as bobinas secundárias e a bobina primária.

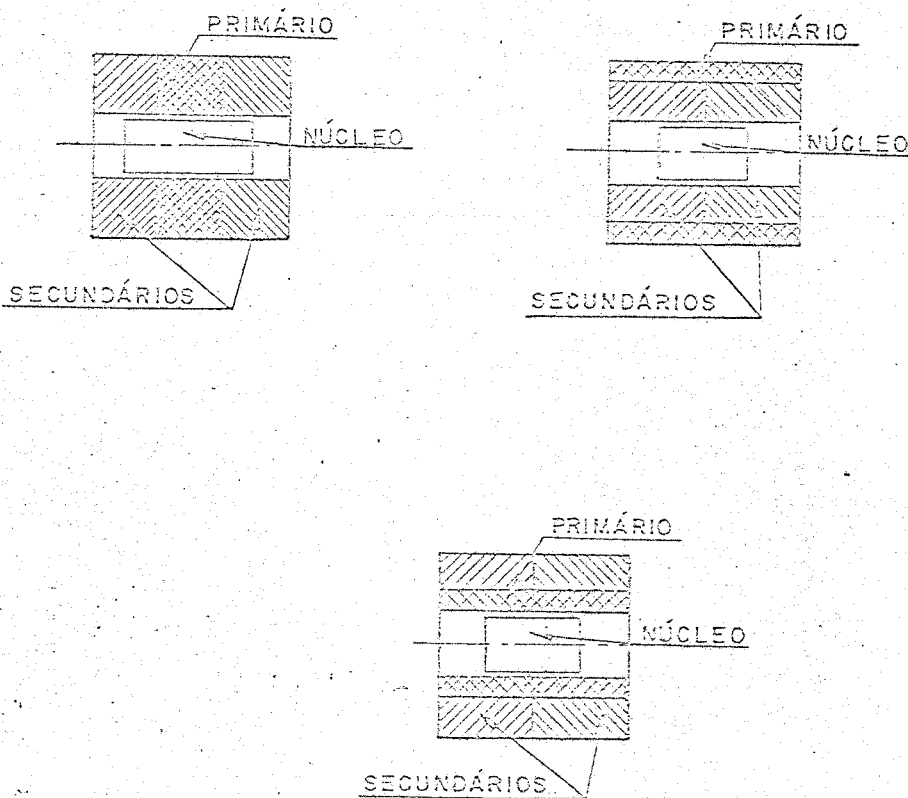
Para dedução da equação da tensão de saída de um transformador diferencial, será considerado um transformador com bobinas superpostas, com a forma mostrado na figura 3.4., cujos enrolamentos têm uma única camada.

Supondo que a auto-indutância do primário permanece constante para os deslocamentos previstos do núcleo, seu valor será  $| S |$ :

$$L_p = K_p \frac{4 \pi N_p^2 (2l_3)^2}{2 l_3 l_1} (r_p^2 - r_i^2 + \mu r_i^2) + \frac{4 \pi N_s^2 (l_1 - 2l_3)^2 r^2}{l_1 - 2l_3 l_1}$$

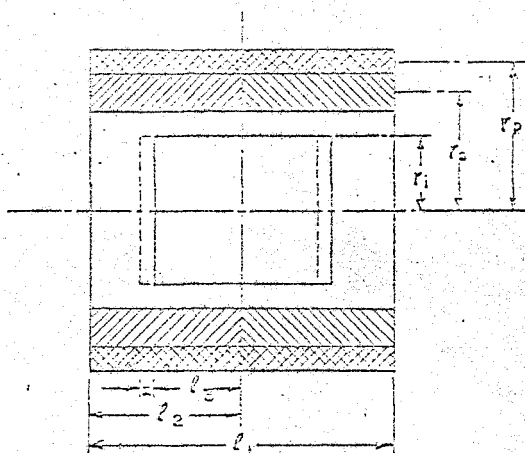
onde

- $K_p$  = coeficiente de Nagaoka
- $\ell_1$  = comprimento da bobina primária
- $2\ell_3$  = comprimento do núcleo magnético
- $N_p$  = número de espiras da bobina primária
- $r_p$  = raio da bobina primária
- $r_3$  = raio do núcleo magnético
- $\mu$  = permeabilidade magnética do núcleo



DISPOSIÇÃO DAS BOBINAS NO  
TRANSFORMADOR DIFERENCIAL

(FIG-3-3)



BOBINA DO TRANSFORMADOR DIFERENCIAL

(FIG-3.4)

Na posição central do núcleo, a indutância de cada bobina secundária será dada por

$$L_s = K_s \left[ \frac{4 \pi^2 N_s^2}{l_3} \left( \frac{l_3}{l_2} \right)^2 (r_s^2 - r_i^2 + \mu r_i^2) + \frac{4 \pi^2 N_s^2}{(l_2 - l_3)} \left( \frac{l_2 - l_3}{l_2} \right)^2 r_s^2 \right] \quad (6)$$

onde

$l_2$  = comprimento da bobina secundária

$r_s$  = raio da bobina secundária

Para um pequeno deslocamento axial do núcleo, as indutâncias das bobinas secundárias serão, respectivamente,  $L_s'$  e  $L_s''$ .

A indutância final das duas bobinas ligadas em série em oposição de fase será

$$L_s = L_s' + L_s'' - 2 M_{22}$$



Representando-se o coeficiente de acoplamento entre  $L_s'$  e  $L_s''$  por  $K''$  ;

$$L_s = L_s' + L_s'' - 2 K'' \sqrt{L_s' L_s''}$$

Uma corrente que circule no primário com amplitude  $I_p$  e frequência  $\omega$  induzirá uma tensão  $V_2$  no secundário

$$V_2 = \omega I_p K' \sqrt{L_p \cdot L_s}$$

Sendo  $K'$  o coeficiente de acoplamento entre o primário e o secundário combinados

$$V_2 = \omega I_p K' \sqrt{L_p (L_s' + L_s'' - 2 K'' \sqrt{L_s' L_s''})}$$

Para desenvolvimento,  $K'$  e  $K''$  serão supostos unitários. Isto equivale a admitir um acoplamento ideal entre os enrolamentos, e é de se supor que estes coeficientes sejam relativamente altos em face da presença do núcleo de ferro.

Os valores de  $L_s'$  e  $L_s''$  quando o núcleo sofre um pequeno deslocamento  $x$  é dado por

$$L_s' = K_s \frac{4\pi N_s^2}{l_3 + x} \left( \frac{l_3 + x}{l_2} \right)^2 (r_s^2 - r_i^2 + \mu r_i^2) + \frac{4\pi N_s^2}{(l_2 - l_3 - x)} \cdot \left( \frac{l_2 - l_3 - x}{l_2} \right)^2 r_s^2 \quad (6)$$

$$L_s'' = K_s \frac{4\pi N_s^2}{l_3 - x} \cdot \left( \frac{l_3 - x}{l_2} \right)^2 (r_s^2 - r_i^2 + \mu r_i^2) + \frac{4\pi N_s^2}{(l_2 - l_3 + x)} \cdot \left( \frac{l_2 - l_3 + x}{l_2} \right)^2 r_s^2$$

simplificando :

$$L_s' = K_s \frac{4\pi N_s^2}{l_2^2} \left[ l_2^2 r_s^2 + l_3^2 r_i^2 (\mu - 1) + x r_i^2 (\mu - 1) \right]$$

$$L_s'' = K_s \frac{4 \pi^2 N_s^2}{l_2^2} \left[ l_2 r_s^2 + l_3 r_i^2 (\mu - 1) - x r_i^2 (\mu - 1) \right]$$

Considerando  $x$  como única variável :

$$L_s^b = (A + Bx) C$$

$$L_s'' = (A - Bx) C$$

onde

$$C = K_s \frac{4 \pi^2 N_s^2}{l_2^2}$$

$$A = l_2 r_s^2 + l_3 r_i^2 (\mu - 1)$$

$$B = r_i^2 (\mu - 1)$$

A tensão de saída  $V_2$  será

$$V_2 = w I_p \sqrt{L_p C} \sqrt{2A - 2\sqrt{A^2 - B^2 x^2}} \quad \text{⑥}$$

Desenvolvendo em série de Taylor

$$\sqrt{A^2 - B^2 x^2} = A - \frac{x^2 B^2}{2A} - \frac{x^4 B^4}{8A^3} - \frac{x^6 B^6}{16A^5} \dots$$

substituindo

$$V_2 = w I_p \sqrt{C L_p} \sqrt{\frac{x^2 B^2}{A} + \frac{x^4 B^4}{4A^3} + \frac{x^6 B^6}{8A^5} \dots}$$

Considerando  $x$  bastante pequeno podemos aproximar para

$$V_2 = w I_p \sqrt{C L_p} \frac{B}{\sqrt{A}} x$$

Admitindo-se que o 2º termo da série aproximada atinja um valor de 1% do primeiro, será calculado o  $x$  permitido.

$$\frac{x^2 B^2}{A} = \frac{100 x^4 B^4}{4 A^3}$$

Será suposta uma permeabilidade  $\mu = 1$ ,  $l_2 = 2 l_3$  e  $r_s = r_i$

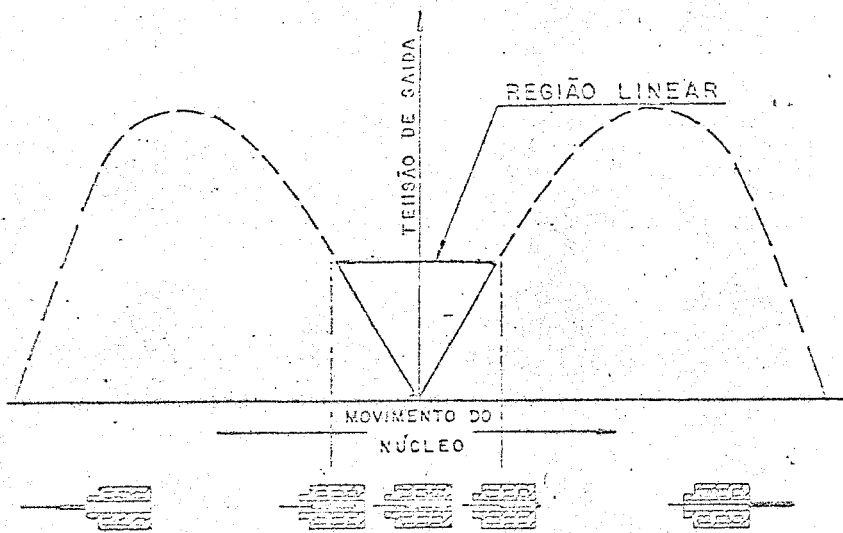
$$A = 6 r_i^2 l_3$$

$$B = 4 r_i^2$$

$$x = 0,3 l_3$$

Ou seja, para deslocamentos em torno da posição central até a 0,3 do comprimento do núcleo, a linearidade do transdutor é igual ou melhor que 1%. ©

A figura 3.6. dá a variação da tensão de saída de um transformador diferencial típico com o deslocamento do núcleo. Na região próxima à posição central do núcleo a saída apresenta-se linear e, após o limite de proporcionalidade, aumenta até alcançar o máximo; e partir do qual cai, à medida que o núcleo é retirado do interior da bobina. Embora os valores das tensões de saída sejam teoricamente os mesmos para deslocamentos simétricos em relação à posição central, há uma variação na fase de  $180^\circ$ . Utilizando-se um detector de fase, pode-se determinar precisamente a posição do núcleo em relação ao centro.



SAÍDA DO TRANSFORMADOR DIFERENCIAL  
(FIG-3.5)

Uma maior sensibilidade do transformador a corrente constante pode ser obtida pelo aumento de sua frequência de operação ou pelo maior número de espiras nos secundários. Para maior facilidade de construção e ajuste, tanto do circuito de alimentação como do circuito destinado a demodular o sinal de saída, a frequência do transdutor é fixa. Outro fator limitado pela frequência é a resposta dinâmica do transdutor. A frequência da corrente de alimentação do transformador deve ser, no mínimo, dez vezes superior à frequência máxima prevista para a excitação mecânica. Como a frequência de alimentação usual pode atingir vários quilohertz, isto não introduz limitação na prática.

A principal vantagem do transformador diferencial sobre os outros tipos de transdutores é a conversão direta do deslocamento em tensão com uma quantidade mínima de atrito. Outra vantagem é a resolução infinita do instrumento aliada a um alto sinal de saída, praticamente independente da variação de umidade e temperatura a que está sujeito. A excelente linearidade e a capacidade de medir deslocamentos desde alguns micra até dezenas de

centímetros são outras das vantagens operacionais.

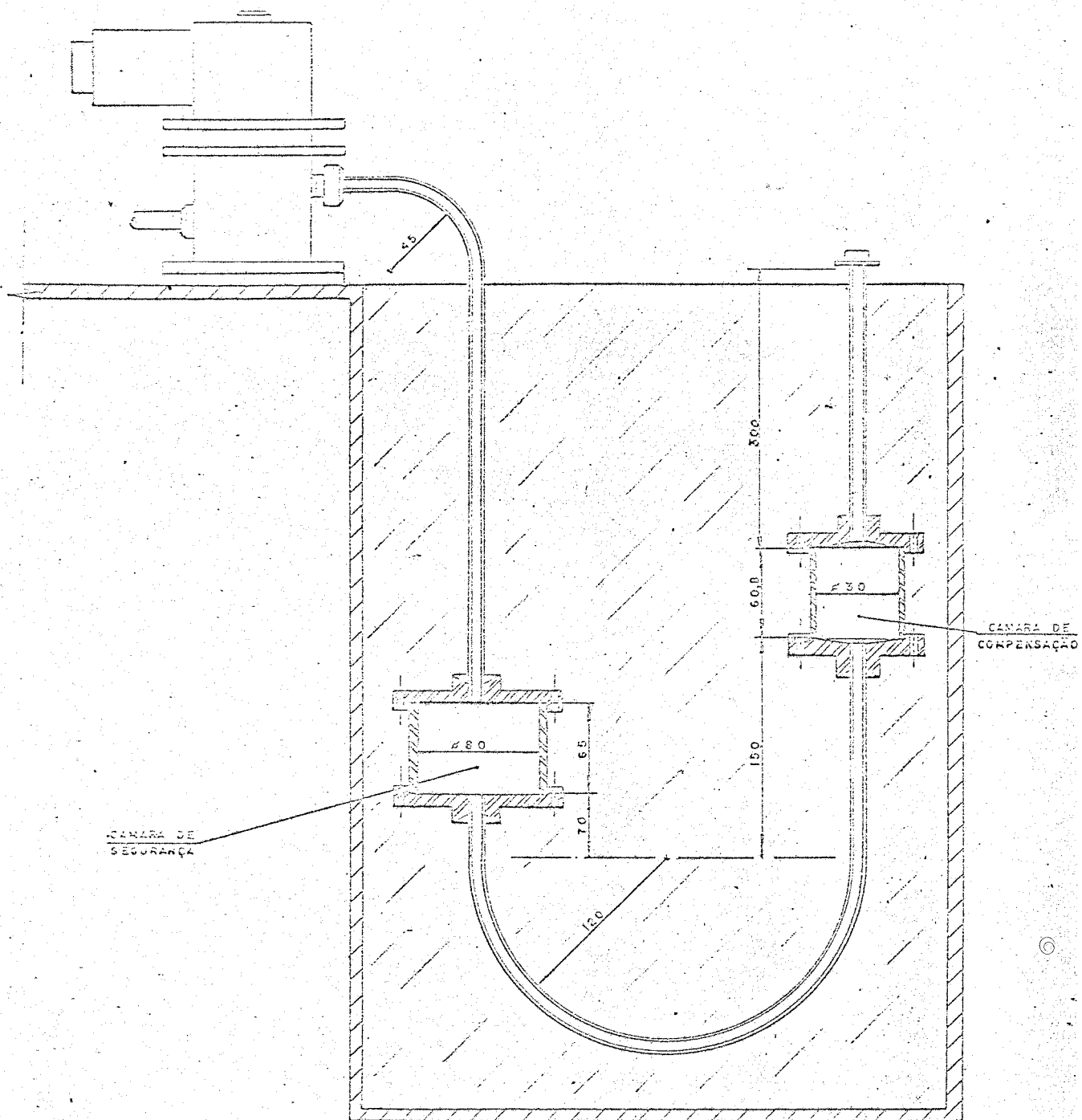
A extrema facilidade de construção e calibração do transformador diferencial é um dos fatores que mais contribui para seu vasto uso. Com um simples voltímetro consegue-se calibrar perfeitamente o instrumento, devido ao seu alto sinal de saída.

#### 4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Dos manômetros citados no capítulo 2, os mais apropriados para este projeto, considerando tanto os alcances quanto a possível confecção no Instituto de Pesquisas Radioativas, são os tipos de tubo fechado, de folha com mola e os de membrana.

##### 4.1. Manômetro de tubo fechado

O primeiro tipo escolhido para confecção de um protótipo foi um manômetro de tubo fechado contendo mercúrio, conforme mostra a figura 4.1. Tendo em vista a segurança de operação, o instrumento foi confeccionado em aço inoxidável, impossibilitando a observação visual do nível de mercúrio no seu interior. Para sua determinação foi colocada no ramo fechado do instrumento um resistor de confecção especial que tem a extremidade superior eletricamente acessível ao exterior e cuja parte inferior está em contacto com o mercúrio. Qualquer variação na pressão medida pelo instrumento altera os níveis do mercúrio, deixando maior ou menor porção do resistor descoberta. Deste modo, o nível do mercúrio pode ser determinado pela simples medida da resistência entre o terminal superior do resistor e a carcaça do instrumento.



MANÔMETRO DE TUBO FECHADO

(FIG-4.1)

Para que a variação volumétrica do gás contido no ramo fechado do manômetro seja uma transformação isotérmica, este deverá ficar permanentemente mergulhado em um tanque, contendo água com temperatura fixa e controlável.

A cada ramo do instrumento foi acoplada uma câmara. No ramo aberto, ao qual se liga a pressão a ser medida, foi colocada a câmara de segurança que tem por finalidade diminuir a diferença entre os dois níveis do mercúrio, e sua seção é cerca de 100 vezes maior que a seção do tubo do ramo fechado. Esta câmara também impossibilita a expulsão do mercúrio do manômetro caso haja uma brusca queda da pressão medida.

A câmara colocada no ramo fechado, câmara de compensação, tem a finalidade de diminuir o comprimento deste ramo, evitando grande variação do nível do mercúrio entre a pressão de 0 e 5 bar. Enquanto o manômetro estiver funcionando dentro do seu alcance, esta câmara permanecerá cheia de mercúrio.

Com a aplicação da Lei de Boyle, pode-se deduzir que a utilização de um resistor com resistividade linear constante no interior do ramo fechado do manômetro fornecerá uma função aproximadamente linear entre a pressão aplicada e o inverso da resistência medida; isto é, considerando-se esta função linear, comete-se um erro menor que 1,5%. Como a precisão total do instrumento, proposta no início do trabalho, foi  $\pm 5\%$ , este erro inicial é perfeitamente admissível. Para a obtenção de um sinal elétrico que varie linearmente com a pressão aplicada, necessita-se de um circuito cuja saída seja inversamente proporcional a uma resistência. Para esta operação foi projetado um amplificador operacional cuja resistência de entrada é a própria resistência apresentada pelo manômetro. Como fonte de sinal constante para o amplificador, utiliza-se um gerador de ondas quadradas com frequência de 4 KHz. O sinal de saída do amplificador operacional sofre posterior amplificação para ser em seguida retificado, de modo a produzir um sinal utilizável por registradores DC.



Como resistor, foi inicialmente usado um fio de níquel cromo concentricamente esticado ao longo do ramo fechado do instrumento. A pequena superfície molhada deste fio não propiciava bom contato elétrico com o mercúrio. Para aumentar a superfície de contato utilizou-se um fio de diâmetro maior, que foi enrolado helicoidalmente com passo constante em torno de um cilindro isolante, com a finalidade de manter a resistividade linear do elemento com um valor apropriado. O contato elétrico deste elemento foi superior ao do anterior, embora persistisse uma instabilidade causada pela contaminação do mercúrio pelo material isolante.

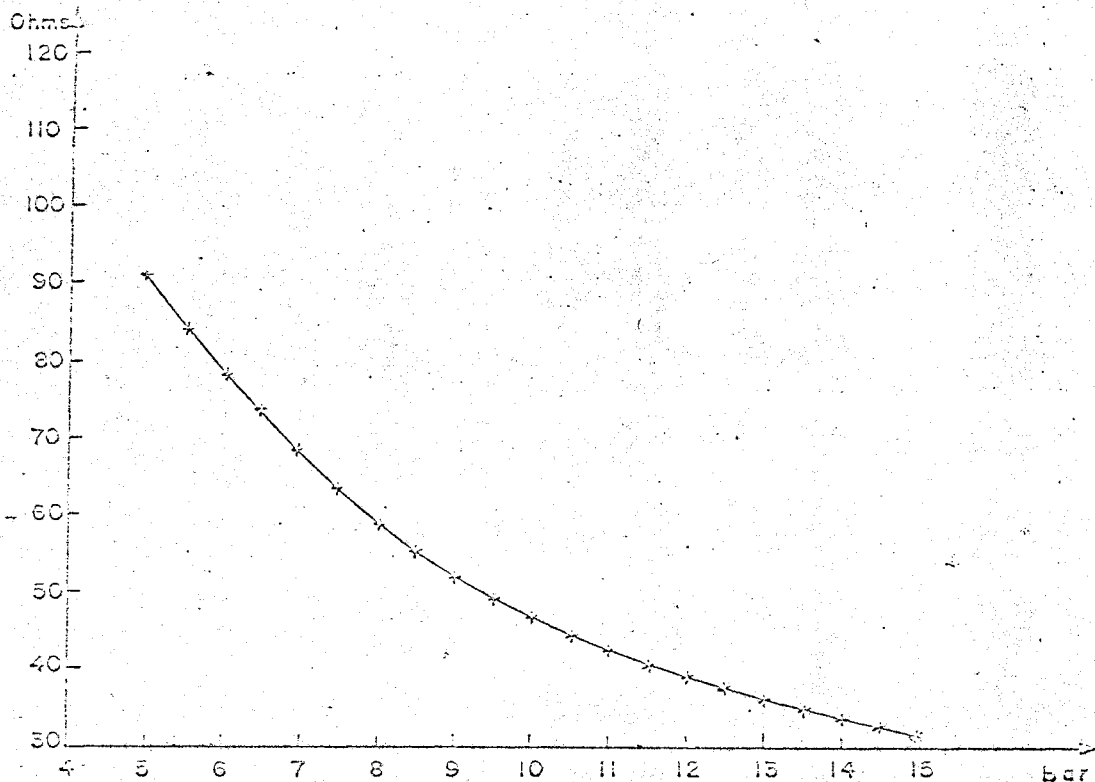
Para confecção do elemento resistivo finalmente utilizado vaporizou-se um fio de níquel cromo, em vácuo, no interior de um tubo cilíndrico de vidro com 4mm de diâmetro externo e 1mm de parede. Após várias tentativas de refino do método desenvolveu-se uma técnica que permitiu a obtenção de um comprimento de tubo adequado (20 cm), cuja resistividade linear apresentava um desvio máximo de linearidade de  $\pm 1\%$ , que foi considerado satisfatório.

Após a montagem do instrumento, o melhor desempenho observado para a relação entre a resistência e a pressão medida, está mostrado na figura 4.2.

Para manipulação da informação fornecida pelo manômetro foi projetada e desenvolvido um circuito constituído por um gerador de onda quadrada e um amplificador operacional.

O gerador utilizado foi um multivibrador astável, que alimenta a rede cinosa apresentada pelo instrumento através de um seguidor de emissor. Para que fosse obtida uma saída do amplificador inversamente proporcional à resistência de entrada, o ganho do primeiro amplificador foi bastante reduzido sendo utilizado um segundo amplificador antes da detecção final do sinal. O circuito utilizado para a manipulação do sinal está na figura 4.3. e o gráfico obtido de sua saída pela variação de resistência de entrada está

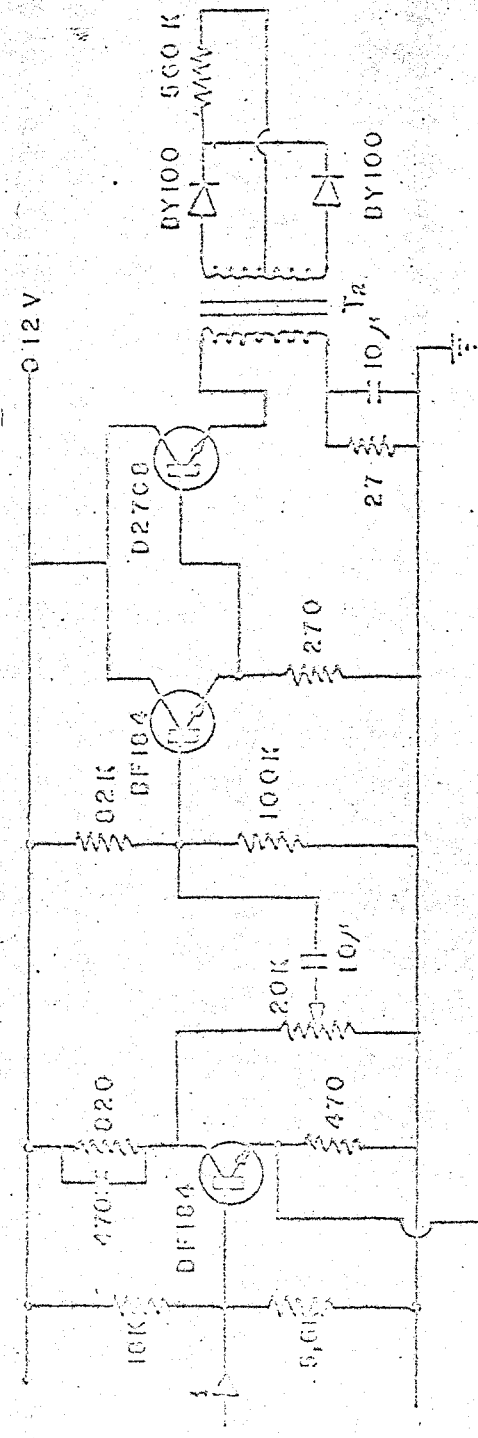
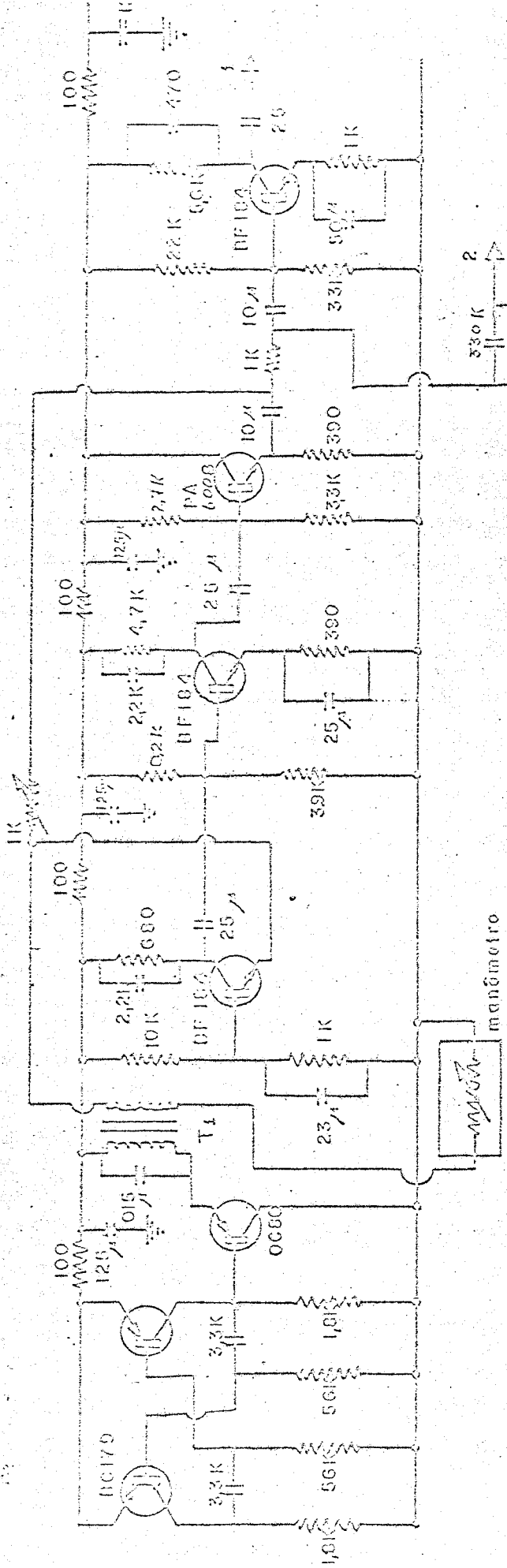
tá na figura 4.4.



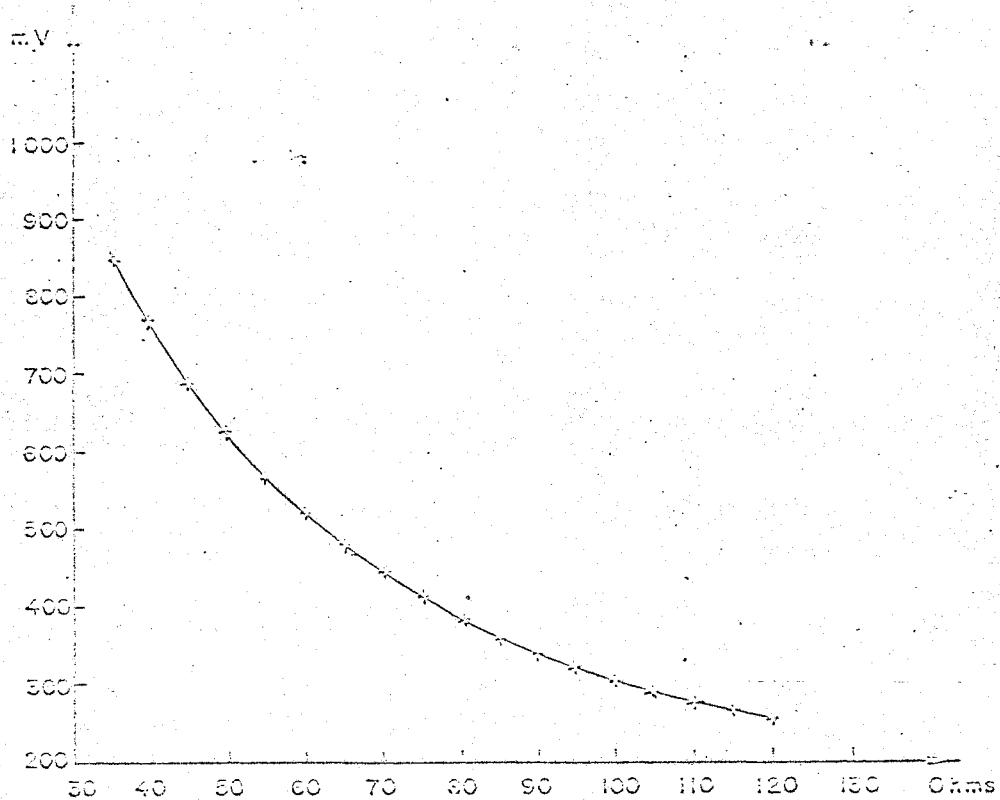
RESPOSTA DO MANÔMETRO DE TUBO FECHADO  
(FIG - 4.2).

Após alguns dias de operação, este protótipo apresentou uma instabilidade insossitável em virtude de resíduos de ácido nítrico provenientes da lavagem do mercúrio e ataque químico dos anéis de vedação e demais componentes do manômetro. Para eliminar esta instabilidade seriam necessários processos relativamente elaborados (tais como destilação do mercúrio, anéis de vedação especiais) para serem usados na confecção de equipamentos convencionais de medidas de pressão.

Tais aperfeiçoamentos não foram atacados nessa fase dos trabalhos, em



CIRCUITO DO MANÔMETRO DE TUBO FECHADO  
 © (FIG-4.3)



RESPOSTA DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL  
( FIG-4.4 )

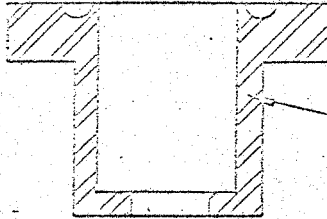
©

vista da conveniência de serem desenvolvidas outras concepções mais simples e mais promissoras (que passarão a ser descritas a seguir) que não exigissem confecção tão elaborada, controle de temperatura de operação, dimensões tão grandes, posicionamento crítico para operação, etc.

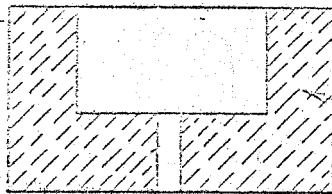
Embora o desenvolvimento deste protótipo não tenha prosseguido, ele proporcionou a oportunidade de se conseguir uma técnica extremamente simples e barata para a confecção de células eletricamente isoladas para pressões de até 20 bar, mostrado na figura 4.5.



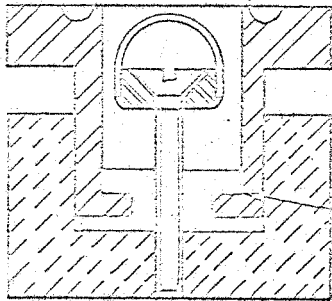
BORNE ELÉTRICO



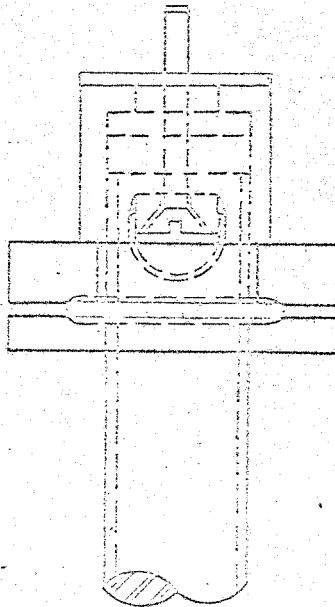
METAL



TEFLON



ARALDITE



SÊLO ELÉTRICO PARA 20 bar

(FIG-4.5)

#### 4.2. Manômetro de fole

Para segundo protótipo foi escolhido um manômetro de fole com mola como transdutor primário. Para efetuar a transdução eletromecânica, considerando a amplitude da excitação mecânica prevista, poderiam ser aplicados 3 tipos de transdutores : a reatância variável, a resistência variável ou a acoplamento magnético variável.

Para a utilização do transdutor a resistência variável, seria necessário transformar a excitação mecânica de um movimento retilíneo em um movimento circular a fim de adaptá-lo aos potenciômetros comercialmente disponíveis. Em virtude dos problemas inerentes a este processo de transdução, este tipo de transdutor não era aconselhável a este caso.

O processo de transdução a reatância variável tem o sério inconveniente de fornecer uma saída não linear com a excitação, como seria desejável. Considerando os pontos acima foi escolhido para transdução o princípio do acoplamento magnético variável, ou seja, o transformador diferencial.

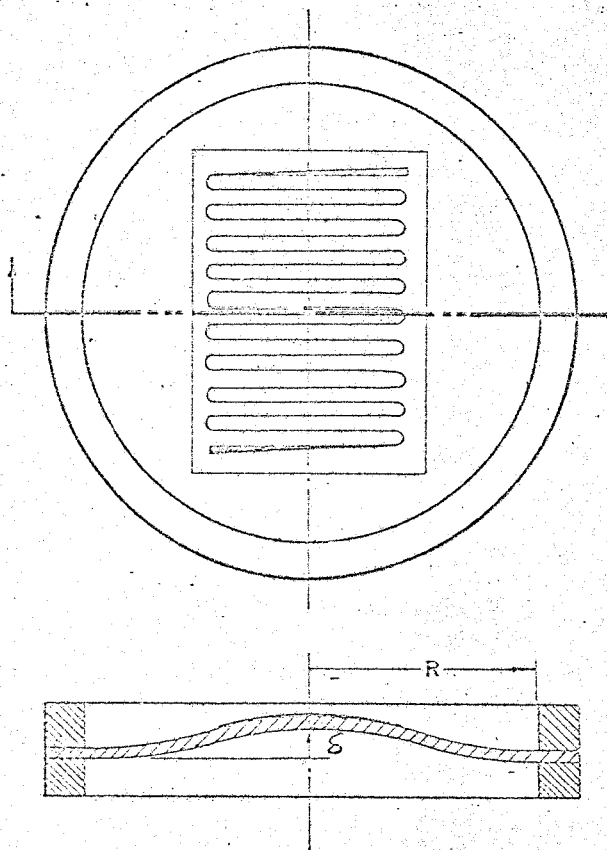
Após a montagem e análise dos resultados apresentados por este protótipo, verificou-se que sua maior falha era a impossibilidade de se fazer medidas abaixo de 5 bar, devido a problemas de histerese. Embora tenham sido preenchidas todas as condições iniciais do trabalho, concluiu-se que deveria proceder-se à confecção de um instrumento de melhor desempenho.

#### 4.3. Manômetro de membrana espessa

A fim de se evitar os erros devido a histerese nas escalas abaixo de 5 bar, foi feito um outro instrumento do tipo de membrana, em aço inoxidável. Como o sinal mecânico produzido por este tipo de instrumento é da ordem de décimos de milímetro além dos 3 tipos de transdutores citados acima, deve-se ainda mencionar o "strain gauge".

Para avaliação do sinal elétrico de saída produzido pelo "strain gauge", no caso de sua utilização para transdução eletromecânica, será supor-

to que o mesmo foi colado à membrana deformada pela pressão. Denominando R o raio e  $\delta$  a flecha, conforme a figura 4.6., será calculado o possível a alongamento transmitido ao "strain gauge".



MEMBRANA COM "STRAIN GAUGE"  
(FIG - 4.6)

Considerando a diferença entre o arco e a poligonal desprezível,

$$(R + \Delta R)^2 = \delta^2 + R^2$$

$$R = \frac{\delta^2}{2 \Delta R}$$

Constata-se imediatamente que a dependência não linear entre seu estiramento e a pressão aplicada constitui um sério óbice a utilização do "strain gauge" neste caso. Isto poderia ser corrigido quer por conformação especial da membrana, quer por "strain gauge" especiais, o que tornaria mais delicada a confecção do instrumento.

Aplicando a relação acima no caso do instrumento construído:

$$R \approx 5 \text{ cm}$$

$$a = 0,05 \text{ cm}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{a^2}{2 R^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{0,05}{5} \right)^2 = 5 \times 10^{-6}$$

Denominando  $\Omega$  a resistência do "strain gauge" e considerando que os comercialmente fabricados têm um fator gauge de 2, aproximadamente:

$$\frac{\Delta \Omega}{\Omega} = \frac{2 \Delta R}{R} = 10^{-4}$$

Supondo a utilização de uma ponte de Wheatstone com todas resistências iguais, que é a mais eficiente, sendo  $e_o$  seu sinal de saída e supondo a corrente do galvanômetro muito pequena, pela figura 4.7. tem-se

$$e_o = E \frac{\Delta \Omega}{2 \Omega} = E \times 0,5 \times 10^{-4}$$

Para avaliação relativa de saída entre o "strain gauge" e o transformador diferencial será suposta uma ponte alimentada com tensão de 10 V. Logo, a amplitude máxima do sinal de saída será:

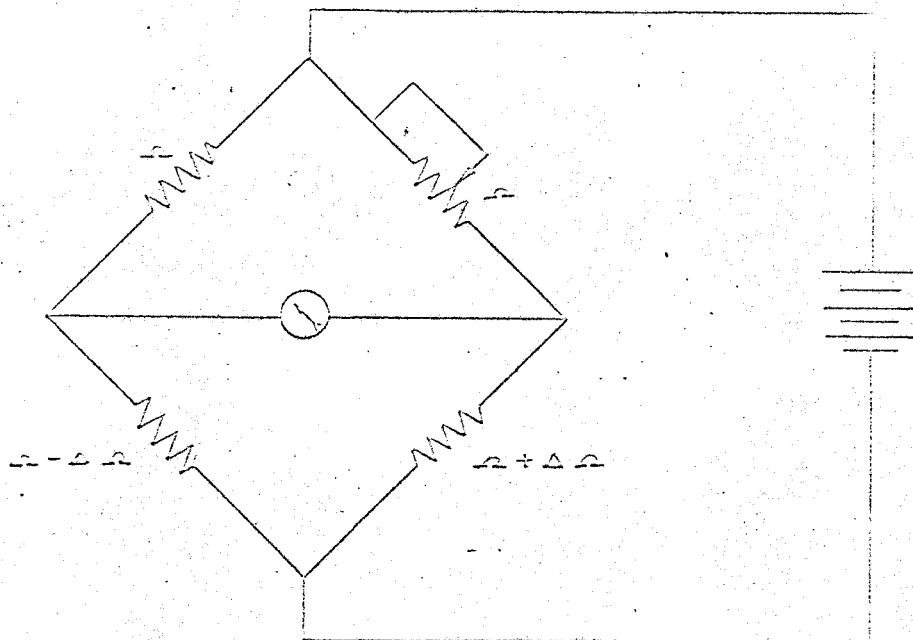
$$e_o = 0,5 \times 10^{-3} \times V = 500 \mu V$$

Os transformadores diferenciais construídos durante o desenvolvimento



do trabalho e apropriados à medida de deslocamentos com amplitude máxima de 2 mm, quando alimentados com tensões de 10 V e 30 KHz, fornecem uma saída de 2 v/mm, ou seja, um sinal de 1 V de fundo de escala quando acoplados ao manômetro de membrana testado.

Comparando a saída dos dois transdutores, vê-se que a saída do transformador diferencial é 2000 vezes maior que a do "strain gauge". Caso se de seje a utilização do "strain gauge" com precisão de 1%, ter-se-á que medir sinais da ordem de 5 V, o que seria inviável considerando-se a existência de um contrólle a S C R atuando em correntes de até  $8 \times 10^3$  A.



PONTE DE WHEATSTONE

(FIG-4.7)

Analisando tanto o transformador diferencial quanto o "strain gauge", quando adaptados ao manômetro de membrana em seus diversos aspectos como, sinal de saída, facilidade de obtenção no Instituto de Pesquisas Radiativas, linearidade, etc. optou-se pelo uso de um transformador diferencial para medidas das flechas da membrana.

## 5. DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS PROPOSTOS

Em seguida ao projeto do manômetro de tubo fechado com mercúrio, foram construídos e testados dois instrumentos : um manômetro de fole com mola e um manômetro de membrana espessa.

### 5.1. Manômetro de fole com mola

#### 5.1.1. Descrição mecânica

Conceitualmente este instrumento é constituído por um fole cilíndrico, em cujo interior é aplicada a pressão a ser medida. A extremidade aberta do fole é fixa, enquanto a fechada se apoia em uma mola externa ao fole. Uma variação da pressão faz com que o fole altere o seu comprimento, comprimindo ou distendendo a mola. Com uma escolha criteriosa, de maneira a tornar muito pequena a histerese do fole em face à constante da mola, ter-se-á um deslocamento da extremidade móvel do fole proporcional à variação da pressão aplicada. ⑥

A escolha dos materiais empregados na confecção deste instrumento foi feita considerando a possível corrosão dos componentes em contato com a água, além das propriedades mecânicas indispensáveis

ao seu bom desempenho.

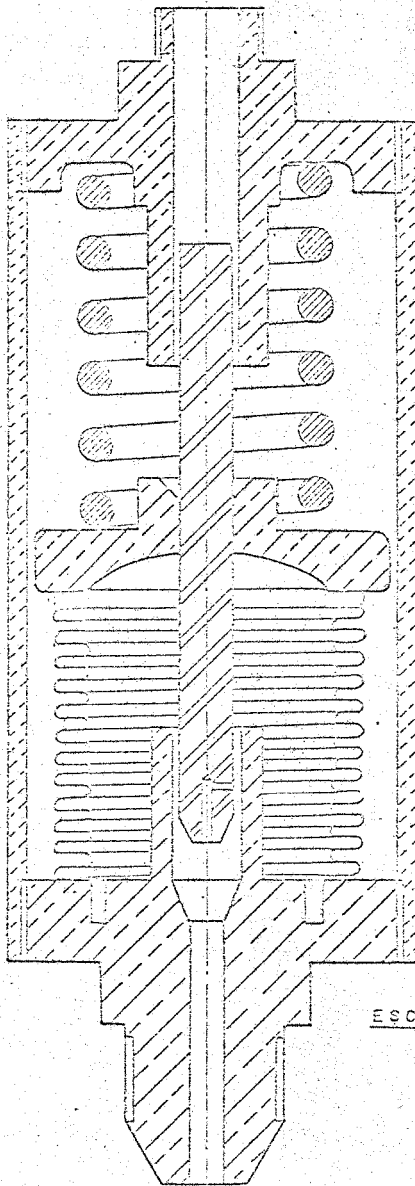
A figura 5.1. mostra o instrumento testado.

A peça destinada à conexão do instrumento com a tomada de pressão foi feita em latão e em uma de suas extremidades foi aberta uma rêsca para ligação à tubulação proveniente da tomada de pressão. Para se minimizar os vazamentos, a superfície de contato é cônica. Na outra extremidade da peça foi aberto um sulco de forma circular, onde é soldada a extremidade aberta do fole. O acoplamento rígido entre esta peça e a caixa do instrumento foi obtido por meio de rêsca.

O fole foi soldado à peça destinada à conexão do instrumento, no sulco feito com esta finalidade. Para se evitar possíveis danos ao fole causados pelo atrito com a mola, entre estas duas peças foi soldado um disco de latão. A face deste disco que se apoia no fole foi usinada de forma a se obter um contato íntimo entre estas duas peças. O diâmetro externo do disco foi dimensionado de modo a evitar que o fole atrite com a caixa do instrumento.

Como fole flexível foi utilizado um de bronze, normalmente empregado na confecção de válvulas de vácuo. Como estes normalmente trabalham à pressão de 1 bar e seriam aqui sujeitos a 15 bar, foram testadas algumas unidades à pressão de 25 bar, não tendo sido notada nenhuma falha em seu funcionamento. Um fator que possibilita aos foles suportarem uma pressão maior é que além do pequeno alongamento envolvido neste emprego, visto que trabalham praticamente comprimidos com expansões menores que 1 cm, o fole tem sua extremidade fechada suportada por um disco de latão, de modo que fica sujeito apenas a es - forças radiais.

Um eixo guia feito em aço inoxidável, concêntricamente colocado, atravessa o disco. Este eixo, além de evitar que o fole seja danifi-



ESCALA - 1:1

MANÔMETRO DE FOLE

(FIG-5.1)

ficado pela força exercida pela mola quando a pressão medida for zero, minimiza pequenos deslocamentos angulares do disco de latão, que travariam o sistema. A parte do eixo interna ao fole serve como um calço e à parte externa foi adaptado, por meio de uma rêsca, o elemento destinado à transmissão do deslocamento do fole ao núcleo do transformador diferencial.

A mola utilizada para confecção do instrumento deveria ter um  $K$  entre 10 e 20 kg/mm para que o deslocamento do núcleo do transformador diferencial ficasse compreendido entre 5 e 10 mm, valor que foi considerado apropriado. A mola utilizada tem um  $K = 13,2$  kg/mm, o que fornece um deslocamento máximo de aproximadamente 7,4 mm.

Um vergalhão de latão, com  $1/8"$  de diâmetro, foi utilizado como elemento de transmissão do deslocamento do fole ao transformador diferencial. Para permitir um ajuste adequado do núcleo ao longo do vergalhão, os dois foram acoplados por meio de uma rêsca.

Para confecção da caixa do instrumento foi utilizado um tubo de alumínio com 51 mm de diâmetro. A fixação do conjunto dentro da caixa foi obtida por meio de uma tampa de latão rosqueada no interior do tubo. Um orifício no centro desta permite a adaptação do transformador diferencial ou um micrômetro para leitura por meios mecânicos.

No corpo do transformador diferencial, feito de material isolante não magnético, foram colocadas as bobinas. No modelo experimental a adaptação foi feita de modo a permitir o deslocamento longitudinal das bobinas, para ajuste do ponto ótimo de funcionamento do instrumento.

### 5.1.2. Descrição do circuito eletrônico

Como tensão de alimentação para todo o circuito, foi escolhida a  $\pm 12$  V, com zero aterrado.

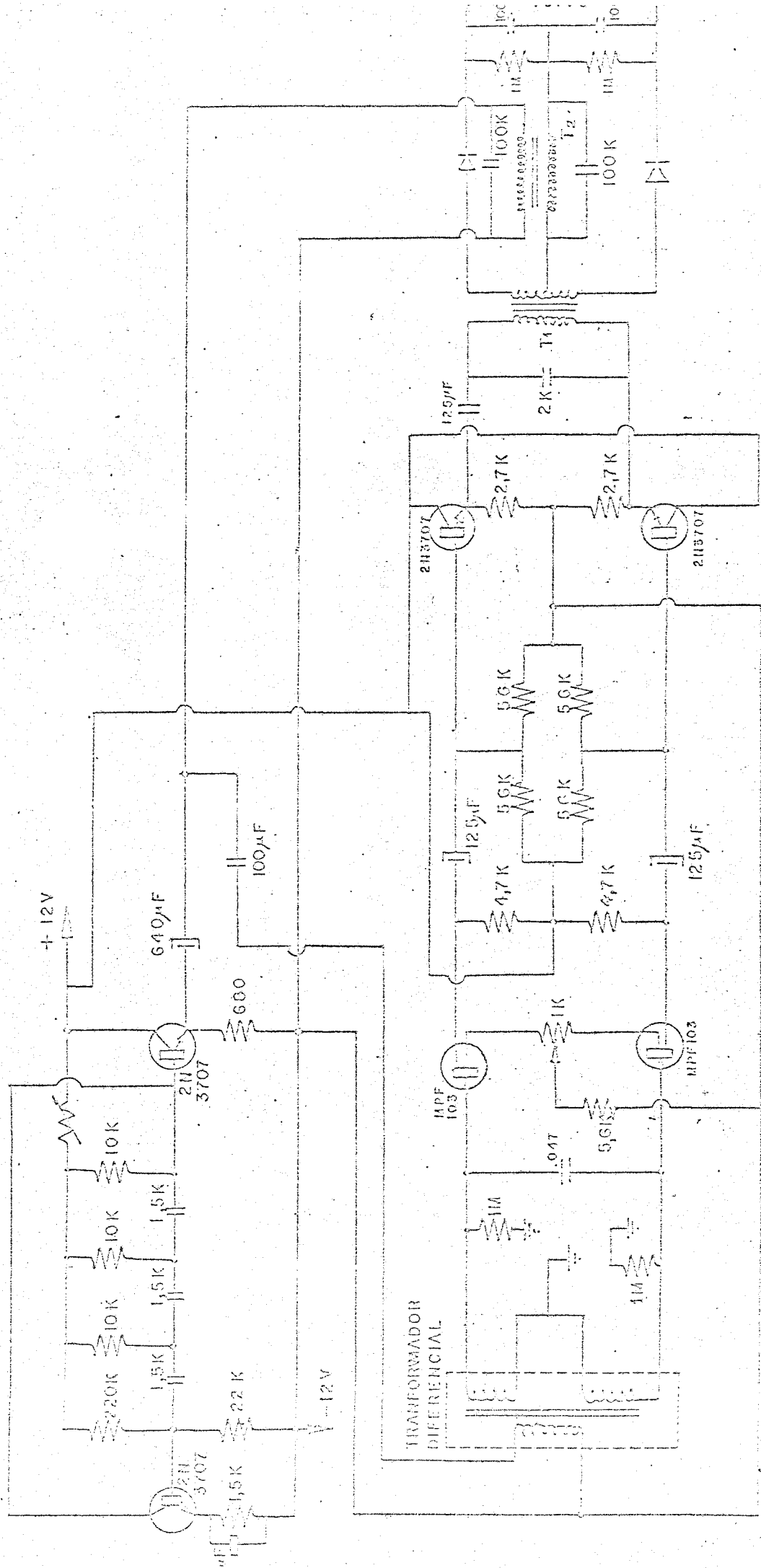
A utilização de um transformador diferencial como transdutor exige uma fonte de sinal alternado para sua excitação, o qual foi obtido utilizando-se um oscilador RC convencional. Um dos grandes inconvenientes deste tipo de oscilador é a distorção produzida no sinal gerado. Para diminuir este problema, foi colocado no circuito de coletor deste oscilador um termistor agindo como controle automático de ganho. Como a utilização de uma frequência compreendida na faixa de áudio favorecia sobremansira a construção do circuito, pela facilidade em se obter os transformadores a ele necessários, foi tomada para frequência do sinal 2,5 KHz. O acoplamento entre a saída do oscilador e o primário do transformador foi feito através de um seguidor de emissor. Para atenuação dos sinais harmônicos porventura ainda produzidos pelo gerador, todos os transformadores constituintes do circuito foram sintonizados.

O sinal proveniente da saída do transformador diferencial foi ampliado para sofrer, em seguida, detecção de fase. Para isto foi usado um amplificador diferencial em cuja entrada foram colocados dois transistores de efeito de campo. Deste modo foi obtido um amplificador com alta impedância de entrada. A grande vantagem de se utilizar aqui o amplificador diferencial, além de sua alta estabilidade a variações de tensão e temperatura, é a possibilidade de se poder equilibrar sua saída, facilitando a zeragem da saída do transformador. ©

Para acoplamento entre a detecção de fase e o amplificador foi inserido no circuito um estágio composto por dois seguidores de emissor.

As bobinas do transformador diferencial, iguais entre si, foram feitas com 1.000 espiras de fio nº 32, cada uma.

A figura 5.2. mostra o circuito utilizado na montagem executada.



CIRCUITO ELETRÔNICO DO GALVÂNOMETRO DE FOLHA

(FIG-5.2)



## 5.2. Manômetro de membrana espessa

### 5.2.1. Descrição da parte mecânica

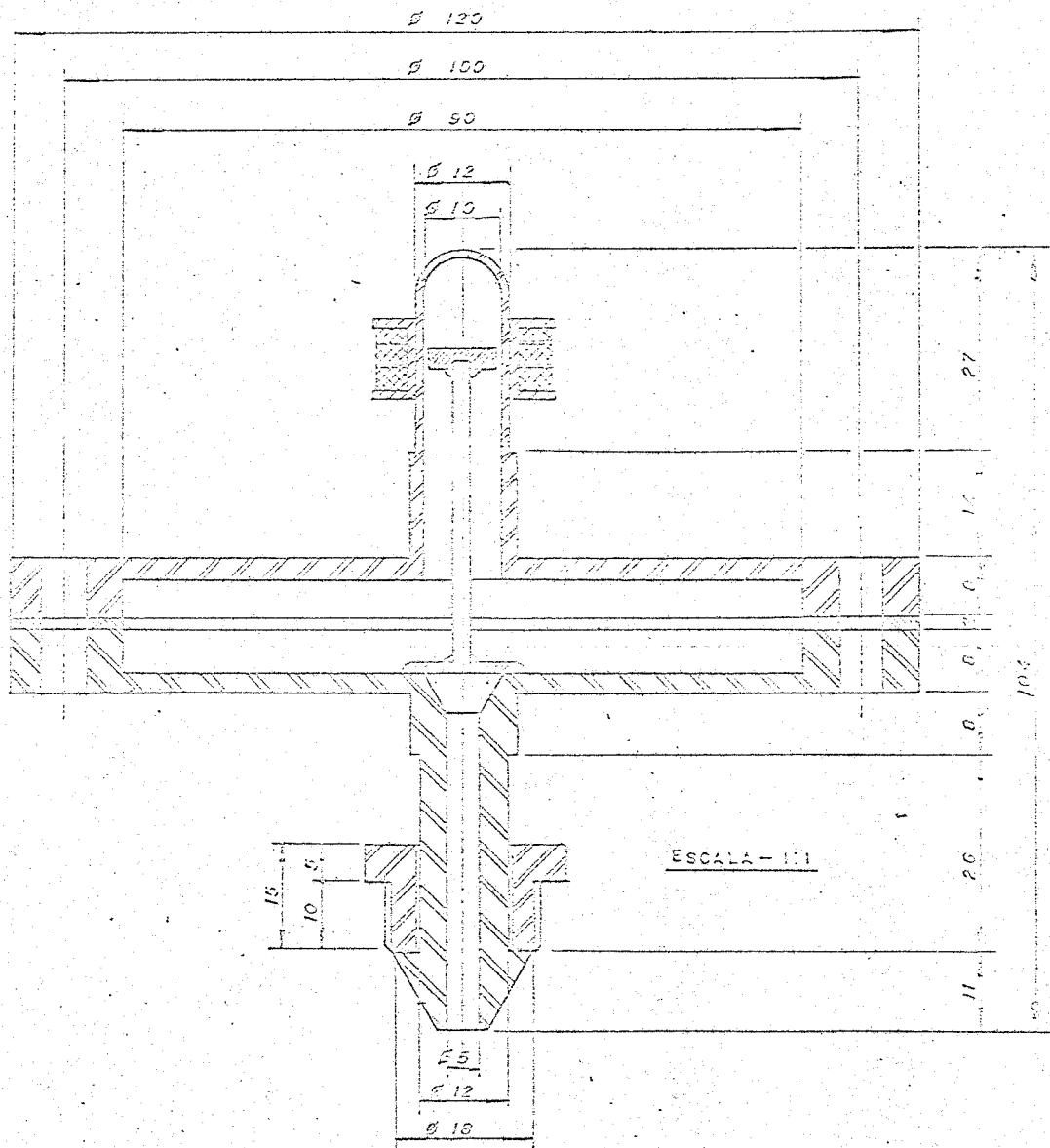
O protótipo é constituído por duas chapas circulares providas de flanges que, quando acoplados, formam também a caixa do instrumento, conforme mostra a figura 5.3.

Para confecção dos flanges foi usado o aço inoxidável, sendo que sua união é feita por meio de 12 parafusos de 1/4". Uma das vantagens da confecção da membrana e da caixa em uma só peça é um perfeito engastamento com ausência total de solda na periferia da membrana. Para perfeita vedação dos flanges, utilizou-se uma junta de cobre recozido entre as duas peças. A um dos flanges foi soldada concêntricamente uma conexão para ser ligada à tomada de pressão. Nesta solda, entre o flange e a conexão, foi colocado um suporte destinado a fixar o núcleo ferromagnético. No outro flange, também concêntricamente, foi soldado um tubo de aço inoxidável com 12 mm de diâmetro externo, destinado não só a conter o núcleo ferromagnético como também a servir de suporte para as bobinas do transformador diferencial.

Conseguiu-se deste modo um instrumento em que praticamente todas as peças em contato com o fluido são de aço inoxidável. ©

Com um dimensionamento apropriado, consegue-se uma relação linear entre a pressão aplicada no interior do manômetro e a flecha da membrana dos flanges. Como o núcleo ferromagnético é solidário a um flange, enquanto os enrolamentos das bobinas excitadora e sensoras do transformador são fixos à outra, ter-se-á um deslocamento relativo do núcleo no interior do transformador, igual ao dobro do deslocamento de cada membrana.

Como o raio do flange é 4,5 cm e a espessura da placa 2,4 mm,



MANÔMETRO DE MEMBRANA ESPÉSSA  
( FIG- 6.5 )

à pressão de 15 bar a flecha de cada membrana será 0,355 mm, o que provocará um deslocamento relativo entre o núcleo e as bobinas do transformador igual a 0,730 mm.

Denominando-se a relação abaixo :

$$0,55 \frac{\delta^3}{h^2}$$

desvio de linearidade, este será igual a 1,24 %, para pressão de 15 bar e 2,4 % para 20 bar.

O campo total de linearidade do transformador construído é da ordem de 2 mm e o deslocamento total do núcleo, cerca de 0,30 mm. Como não se justificaria a construção de um detector de fase para utilização da região central de linearidade do transformador diferencial, decidiu-se utilizar apenas uma de suas regiões lineares. Note-se que a variação do acoplamento é provocada através do suporte de aço inoxidável. Isto causa uma atenuação desprazível, dada sua alta resistividade, mas simplifica sobremaneira o projeto do manômetro e resulta em maior segurança e isolamento completa entre seu exterior e interior.

### 6.2.2. Circuito eletrônico

Para alimentação geral do circuito foi utilizado + 24 V.

Considerando-se a baixa distorção gerada pelos osciladores L C, aliada à boa estabilidade de frequência e amplitude, foi construído um oscilador deste tipo para excitar a bobina primária do transformador diferencial. Uma das maiores desvantagens deste tipo de oscilador para frequências compreendidas na faixa de áudio é o alto valor do indutor necessário. Como a bobina primária do transformador diferencial tem uma

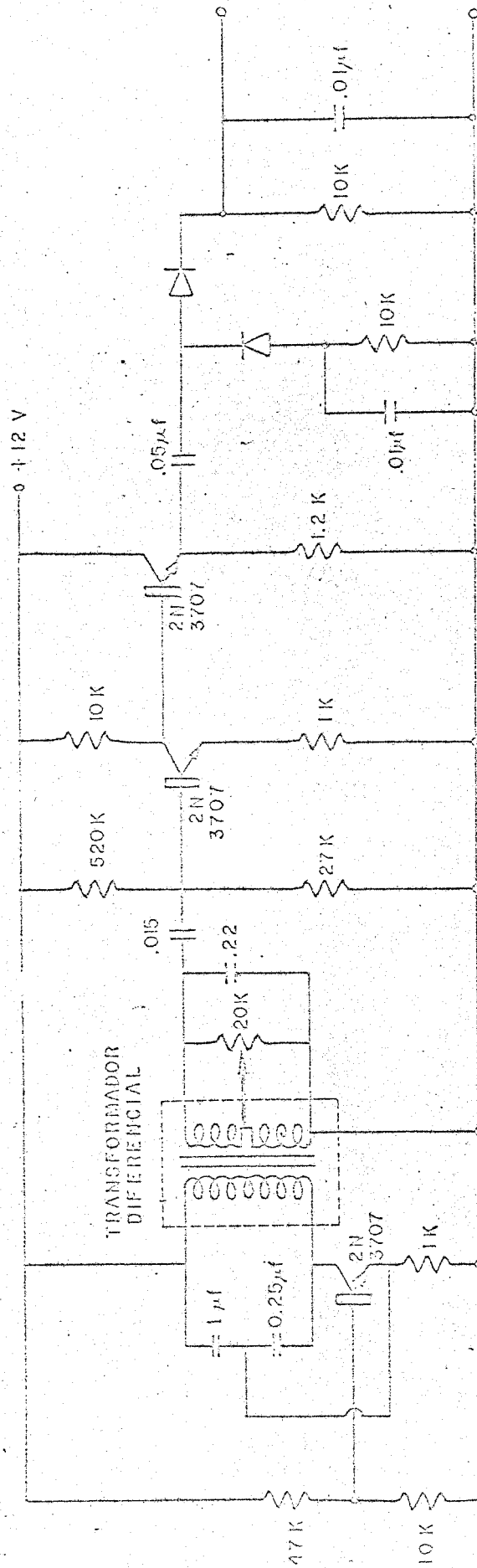
indutância aproximada de 5 mH, a mesma foi colocada como parte integrante do oscilador, em seu circuito tanque. Conseqüentemente, optou-se pelo oscilador tipo Colpitts, visto que o tipo Hartley exigiria a colocação de tomadas intermediárias na bobina.

A bobina primária do transformador diferencial, fazendo parte integrante do oscilador, simplificou bastante o restante do circuito destinado à sua excitação. A alta corrente exigida na bobina primária resulta de ressonância do circuito tanque, não requerendo portanto um estágio de alta corrente e dissipação elevada para esta finalidade. O baixo acoplamento entre o primário e o secundário com a alta impedância da carga de saída do transformador diferencial cria um alto Q do circuito, aliado à excelente estabilidade de frequência e baixa distorção. A frequência escolhida foi de 12 KHz.

O amplificador colocado à saída do transformador diferencial tem dois estágios com um seguidor de emissor na saída e ganho aproximado igual a 10. O estágio final alimenta um detector de amplitude convencional, que fornece sinal proporcional à pressão.

O circuito descrito tem seu esquema na figura 5.4.

A bobina excitadora do transformador diferencial tem 500 espiras de fio nº 38, enquanto que as sensoras tem 2.500 espiras de fio nº 42 cada uma.



CIRCUITO DO MANÔMETRO DE MEMBRANA ESPÉSSA

( FIG-5.4 )

## 6. RESULTADOS OBTIDOS E SUA ANÁLISE

### 6.1. Equipamento utilizado

Para que os testes dos instrumentos propostos fossem completos necess<sup>ari</sup>o utilizar-se-ia de um padrão de pressão, equipamento inexistente no Instituto de Pesquisas Radioativas. Desta modo, foram utilizados nos testes dos ins<sup>tru</sup>mentos 3 manômetros de Bourdon como referência. Quatro deles possuem escalas de 0 a 25 Kg/cm<sup>2</sup> sendo de procedência nacional, marca Willy, com precisão igual a 1% do valor de fundo de escala. O outro manômetro, marca Hartmann Braun, tem escala de 0 a 10 Kg/cm<sup>2</sup>, com a mesma precisão. Como fonte de alta pressão, utilizou-se uma garrafa de nitrogênio gasoso. ©

Embora os testes efetuados não forneçam uma indicação do comportamento absoluto dos instrumentos melhor que 1%, por seu intermédio pode-se observar a linearidade apresentada pelos mesmos comparada com a dos manômetros de referência. Caso o instrumento sob teste apresenta uma boa linearidade, sua calibração final ficará dependente apenas da existência de um padrão adequado de pressão.

### 6.2. Manômetros de fole

#### 6.2.1. Teste dos componentes

Como o manômetro de fole apresentou um erro relativamente alto devido à histerese em seu teste inicial, cada uma de suas partes móveis foi analisada para se determinar o motivo do erro. Esta análise consistiu em se obter os gráficos tensão-deformação, tanto da mola, quanto do fole empregados na confecção do instrumento. Estes diagramas foram determinados com o auxílio da máquina INSTRON existente na Divisão de Ciências dos Materiais deste Instituto.

O diagrama tensão-deformação apresentado pela mola está na figura 6.1., tanto em regime de compressão como de expansão.

Supondo o diâmetro efetivo do fole igual a 3,5 cm, a força total aplicada à mola no fim de escala será 144 Kg, sendo sua variação de 98 Kg, quando a pressão for alterada de 5 para 15 bar. Como o K da mola na região de operação do manômetro foi 132 Kg/cm, o curso do fole do manômetro durante seu funcionamento é de 7,3 mm entre os extremos da escala proposta.

A histerese introduzida pela mola no sistema pode ser determinada medindo-se a distância entre as duas retas da figura 6.1., a 7,3mm do ponto de compressão máxima. Esta distância equivale a 1,5 Kg, o que corresponde a uma pressão de 0,15 bar. Como este valor é 1,5% do valor médio da escala, pode-se prever a introdução de um erro aproximadamente igual a 0,75% pela mola. ⑥

Na figura 6.2. está o gráfico do comportamento tensão deformação para o fole, sendo que o processo utilizado para sua obtenção foi idêntico ao empregado para a mola. O gráfico apresentado mostra que o fole não obedece à lei de Young, ou seja, sua deformação não é proporcional à força aplicada. A histerese introduzida pelo fole no sistema pode ser determinada pelo método idêntico ao empregado para a mola, sendo equivalente a  $1 \cdot 10^{-3}$  bar.

Kg

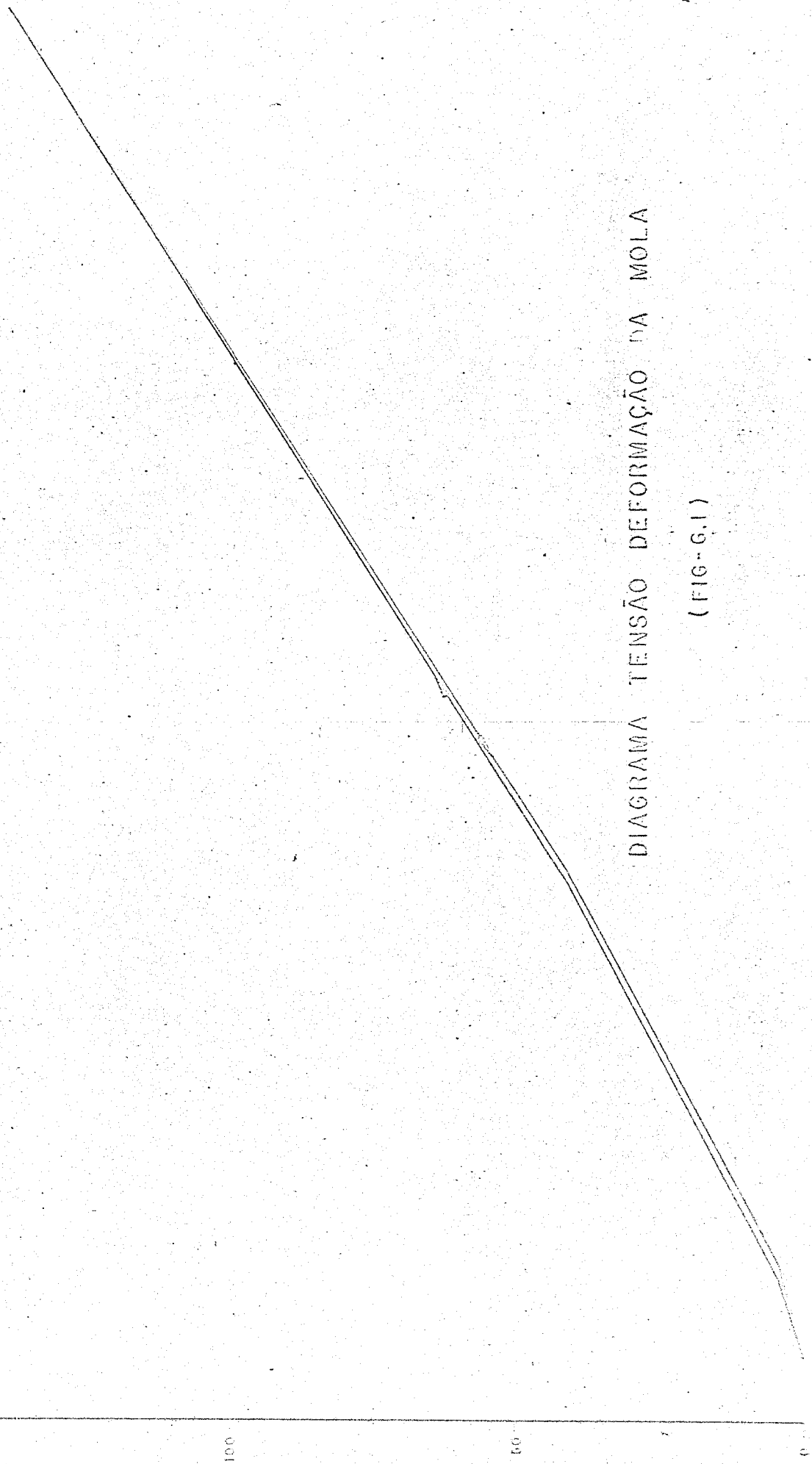


DIAGRAMA TENSÃO DEFORMAÇÃO DA MOLA

(FIG-6.1)

0 0,20 0,50 0,75 1,00 1,25 cm



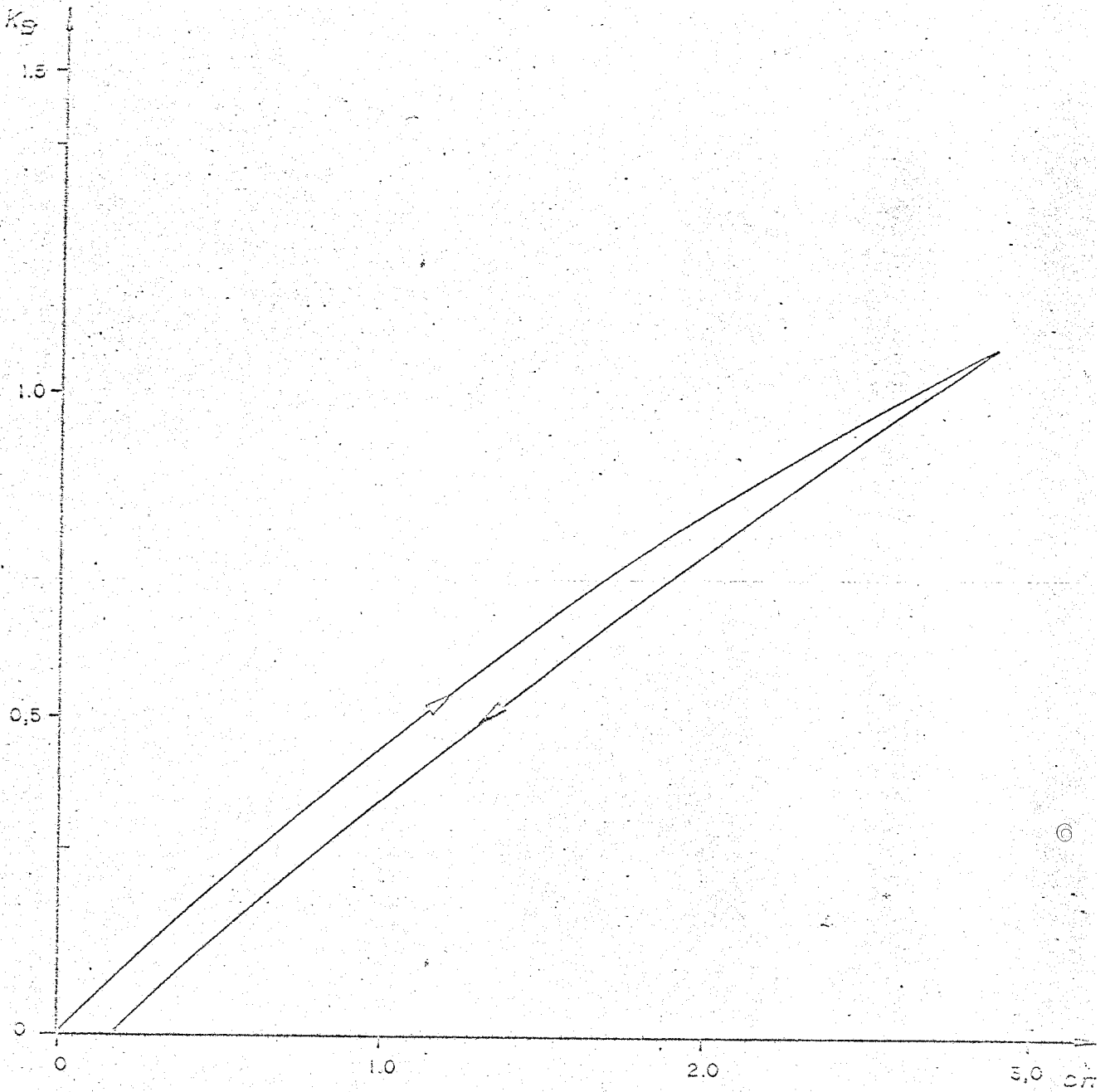


DIAGRAMA TENSÃO DEFORMAÇÃO DO FOLE

(FIG-6.2)

Uma análise dos gráficos permite que sejam desprezados tanto a não linearidade quanto a histerese introduzidas pelo fole, em face dos valores apresentados pela mola. Estima-se que qualquer erro apresentado pelo manômetro, além de 1%, será proveniente de atrito mecânico entre suas peças.

#### 6.2.2. Resultados obtidos

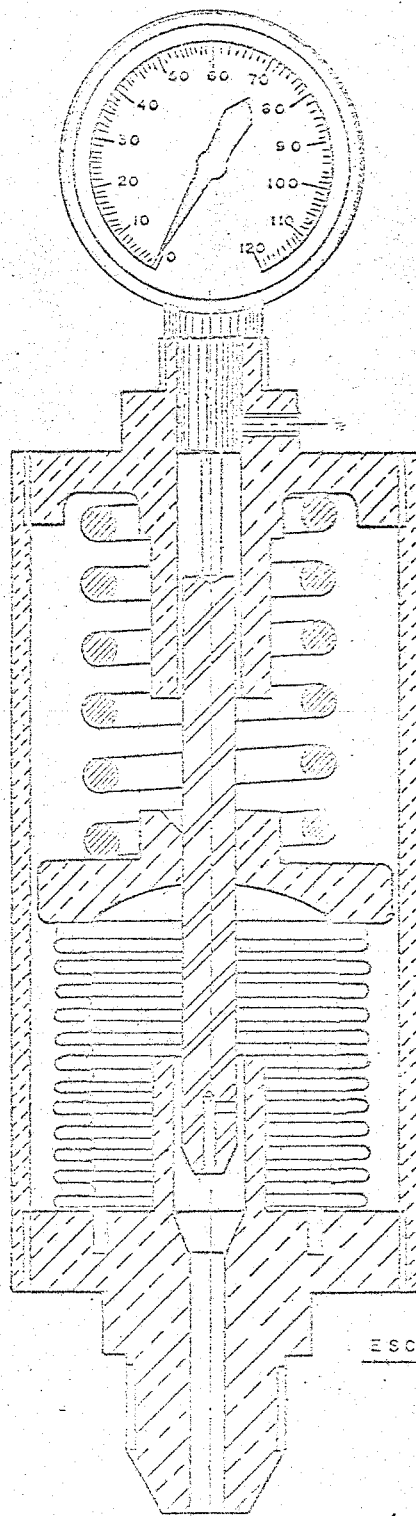
Para a obtenção da resposta do instrumento foram, inicialmente, traçadas curvas referentes ao deslocamento do tópo do fole em relação à pressão aplicada. Para medida dos deslocamentos foi utilizado um micrômetro, conforme a figura 6.3. Foram traçadas curvas referentes ao aumento de pressão de 5 a 15 bar e em seguida referentes ao abaixamento de pressão, de 15 a 5 bar.

Na tabela 6.1. está a média dos diversos pontos obtidos na região de 5 a 10 bar, com a utilização do manômetro Hartmann-Braun, e na tabela 6.2. a dos pontos referentes à região de 5 a 15 bar, obtidos com os manômetros Willy. Para se eliminar erros referentes a deslocamentos de zero entre os dois manômetros tomados como referência, os pontos sofreram um ajuste.

Para avaliação do desempenho mecânico do instrumento, foram considerados os pontos da tabela 6.1. e os pontos da tabela 6.2., sendo que nesta foram somente considerados os referentes à região de 10 a 15 bar.

Com estes pontos, utilizando-se o método dos mínimos quadrados, foi determinada a reta :

$$P = 0,1434 \text{ U bar/mm} + 3,731 \text{ bar} \quad (6.1)$$



ESCALA - 1:1

MANÔMETRO DE FOLE COM MICROMETRO

( FIG-6.3 )

onde

L = deslocamento em mm

P = pressão em bar

Na figura 6.4. estão os pontos obtidos experimentalmente com a reta determinada.

O maior desvio obtido entre a reta determinada e a medida feita com os manômetros tomados como referência foi 2,7 % do valor médio da escala.

Para obtenção da resposta eletrônica, foi utilizado um voltímetro digital Hewlett-Packard, com 4 dígitos e 100 M  $\Omega$  de impedância de entrada. A montagem do transformador diferencial no manômetro foi feita conforme a figura 6.5. O método empregado para sua obtenção foi idêntico ao anterior, sendo que os pontos obtidos estão na tabela 6.3. e 6.4.

A reta representativa da saída elétrica do instrumento é

$$P = 7,52 e \text{ bar/volt} + 9,94 \text{ bar} \quad (6.2)$$

onde

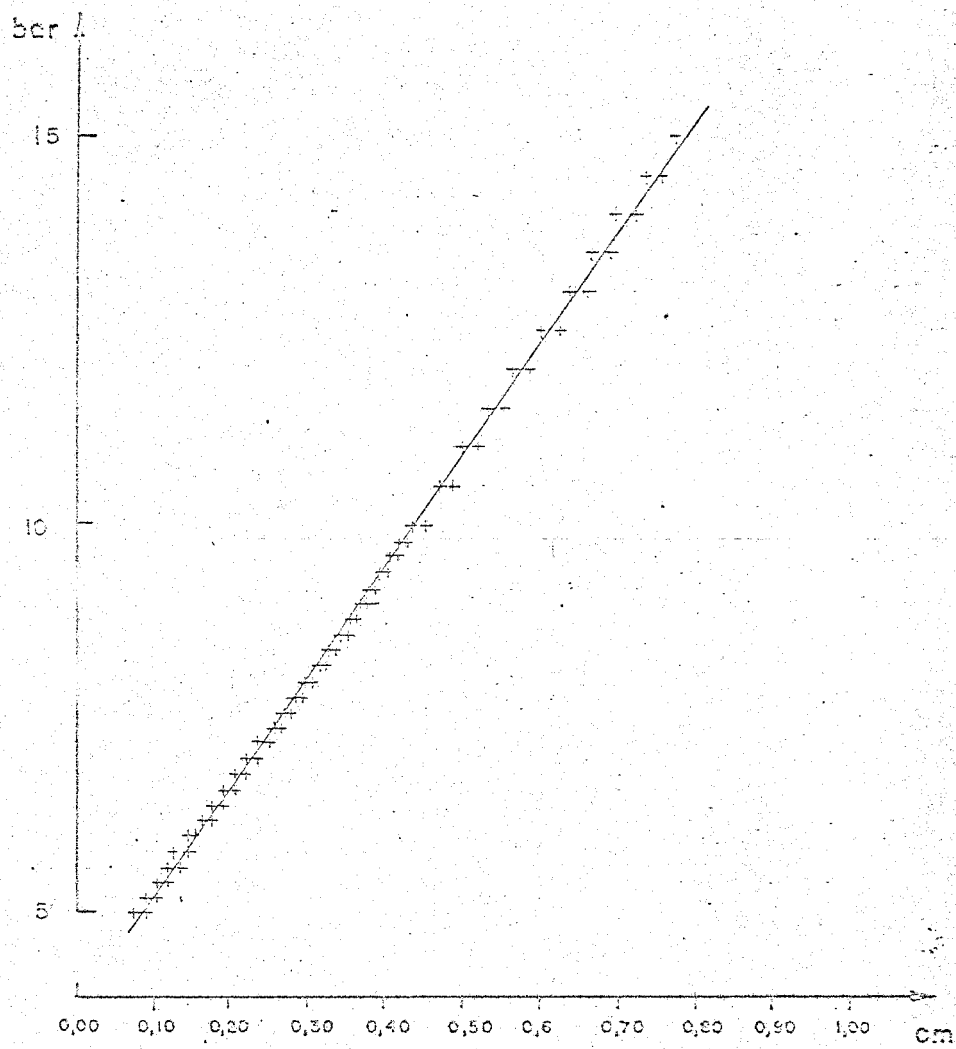
P = pressão em bar

e = tensão de saída em volts.

Na figura 6.6. estão representados os pontos obtidos com a respectiva reta. O desvio de linearidade da resposta elétrica em relação aos manômetros de referência foi 2,28%.

### 6.2.3. Análise dos resultados

Comparando o erro total obtido com o erro introduzido pela me-



RESPOSTA MECÂNICA DO MANÔMETRO DE FOLE

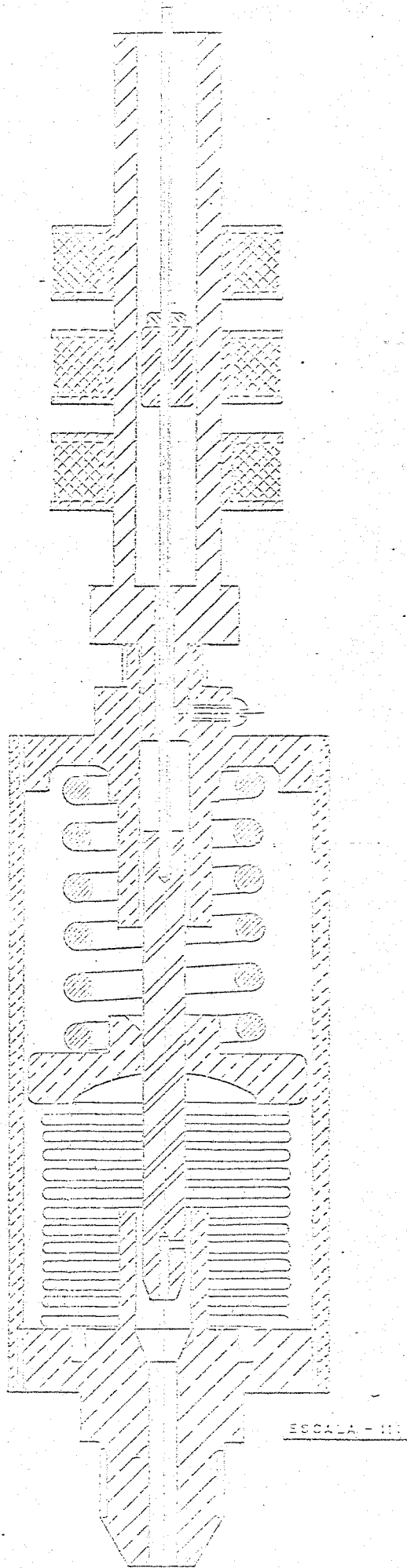
(FIG-6.4)

TABELA 6.1.

PRESSÃO DZF	DESLOCAMENTOS $10^{-2}$ mm	
	ACRÉSCIMOS	DECRÉSCIMOS
5,0	75	88
5,2	89	102
5,4	104	118
5,6	119	134
5,8	124	147
6,0	147	160
6,2	163	176
6,4	176	192
6,6	193	207
6,8	207	222
7,0	224	238
7,2	238	250
7,4	254	266
7,6	269	279
7,8	283	295
8,0	298	308
8,2	314	322
8,4	327	336
8,6	341	350
8,8	356	363
9,0	368	376
9,2	382	389
9,4	395	402
9,6	408	416
9,8	422	430
10,0	436	

TABELA 6.2.

PRESSÃO bar	DESLOCAMENTOS $10^{-2}$ mm	
	ADRESCIMOS	DECRESCIMOS
5,0	73	85
5,5	115	127
6,0	148	163
6,5	184	200
7,0	223	241
7,5	262	282
8,0	301	317
8,5	333	348
9,0	368	383
9,5	403	418
10,0	435	452
10,5	469	485
11,0	499	518
11,5	531	551
12,0	565	585
12,5	602	620
13,0	637	653
13,5	668	686
14,0	698	720
14,5	732	752
15,0	771	



6

MANÔMETRO DE FOLE COM TRANSFORMADOR DIFERENCIAL

(FIG-65)

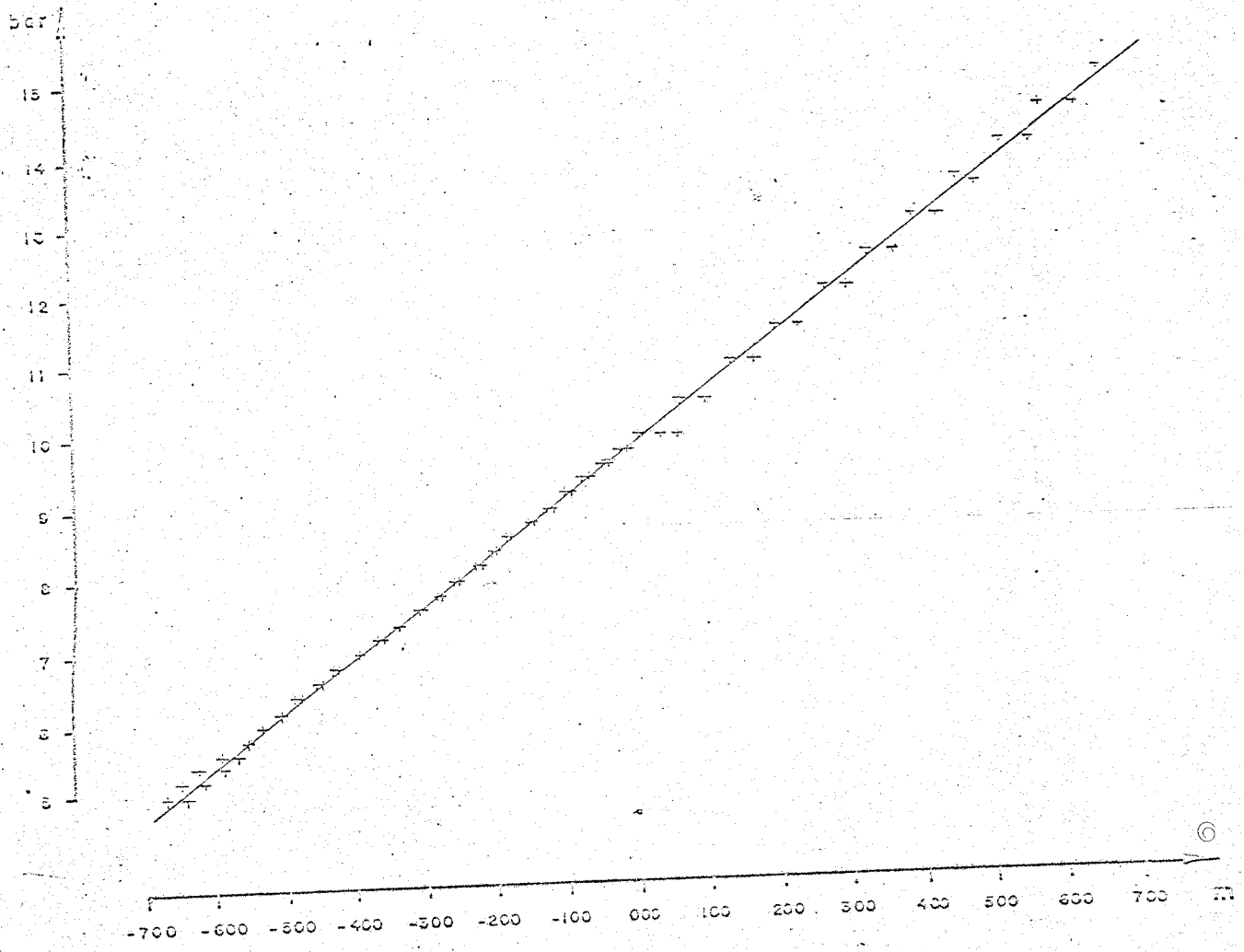


TABELA 6.3.

PRESSÃO BAR	TENSÃO DE SAÍDA EM mV	
	ACRÉSCIMOS	DECRESCIMOS
5,0	- 659	- 637
5,2	- 650	- 611
5,4	- 622	- 586
5,6	- 596	- 562
5,8	- 566	- 549
6,0	- 530	- 530
6,2	- 505	- 505
6,4	- 480	- 477
6,6	- 451	- 444
6,8	- 421	- 416
7,0	- 394	- 391
7,2	- 366	- 363
7,4	- 337	- 336
7,6	- 310	- 309
7,8	- 287	- 281
8,0	- 260	- 262
8,2	- 234	- 228
8,4	- 206	- 200
8,6	- 179	- 174
8,8	- 153	- 148
9,0	- 126	- 121
9,2	- 101	- 93
9,4	- 73	- 67
9,6	- 47	- 39
9,8	- 21	- 12
10,0	+ 6	

TABELA 6.4.

PRESSÃO bar	TENSÃO DE SAÍDA EM mV	
	ACRÉSCIMOS	DECRÉSCIMOS
5,0	- 679	- 652
5,5	- 608	- 583
6,0	- 544	- 519
6,5	- 476	- 444
7,0	- 406	- 366
7,5	- 346	- 296
8,0	- 273	- 235
8,5	- 212	- 166
9,0	- 138	- 106
9,5	- 64	- 30
10,0	0	+ 31
10,5	+ 68	+ 98
11,0	+ 134	+ 162
11,5	+ 193	+ 225
12,0	+ 253	+ 288
12,5	+ 326	+ 350
13,0	+ 393	+ 422
13,5	+ 464	+ 482
14,0	+ 512	+ 556
14,5	+ 576	+ 615
15,0	+ 650	



RESPOSTA ELÉTRICA DO MANÔMETRO DE FOLE

(FIG-6.6)

la, assina-se que cerca de metade do erro total é devido ao atrito na cápsula. O próprio atrito interno do manômetro utilizado no teste contribuiu para um aumento da histerese.

Para reduzir a histerese ao mínimo, a mola foi pretensionada com conseqüente redução das folgas.

Apesar disto, a menor histerese conseguida foi de 0,22 bar. Isto resulta em erro relativo da resposta elétrica de 2,2% do meio da escala (10 bar), que impede a medida de valores inferiores a 5 bar, limitando o alcance do aparelho. Embora tal não tenha sido proposta, a utilização do instrumento nesta região seria bastante proveitosa.

Embora o manômetro tenha satisfeito as condições propostas, o risco ocasionado pela operação do fole próximo à sua tensão de ruptura (30 bar) no caso de uma sobrecarga, aliado às considerações acima, fez com que fosse desenvolvido um outro tipo de instrumento de desempenho superior.

### 6.3. Manômetro de membrana espessa

#### 6.3.1. Resultados obtidos

Para obtenção da resposta do manômetro de membrana espessa, foram utilizados uma fonte de tensão estabilizada e um voltímetro digital com 4 digitais e 100 M $\Omega$  de impedância de entrada.

Nos testes iniciais o instrumento não apresentou histerese, comparado com a resposta do manômetro Willy tomado como referência. Portanto foi traçada uma curva com cada um dos 5 instrumentos disponíveis. Com o manômetro Hartmann-Braun foi determinada a resposta de 0 a 10 bar, enquanto que nos manômetros Willy utilizou-se a região de 0 a 20 bar. Como as curvas foram bastante semelhantes, tomaram-se as mé-

dias das leituras dos manômetros Willy para determinação da reta representativa da resposta do instrumento. A reta determinada (figura 6.7) para a região de 5 a 15 bar foi

$$P = 10,626 \text{ e bar/V} + 0,5362$$

sendo

P = pressão em bar

e = tensão de saída em V

Na tabela 6.8. estão os diversos pontos obtidos e os valores estimados para o manômetro nesta região com as respectivas diferenças. O maior desvio de linearidade calculado foi 0,042 bar, ou seja, aproximadamente 0,5% do valor médio da escala. A comparação entre este desvio com o erro admitido no início do trabalho indica que o instrumento apresentou um desempenho cerca de dez vezes superior ao estipulado.

A análise feita para uso do instrumento entre 0 e 20 bar forneceu como reta representativa da resposta

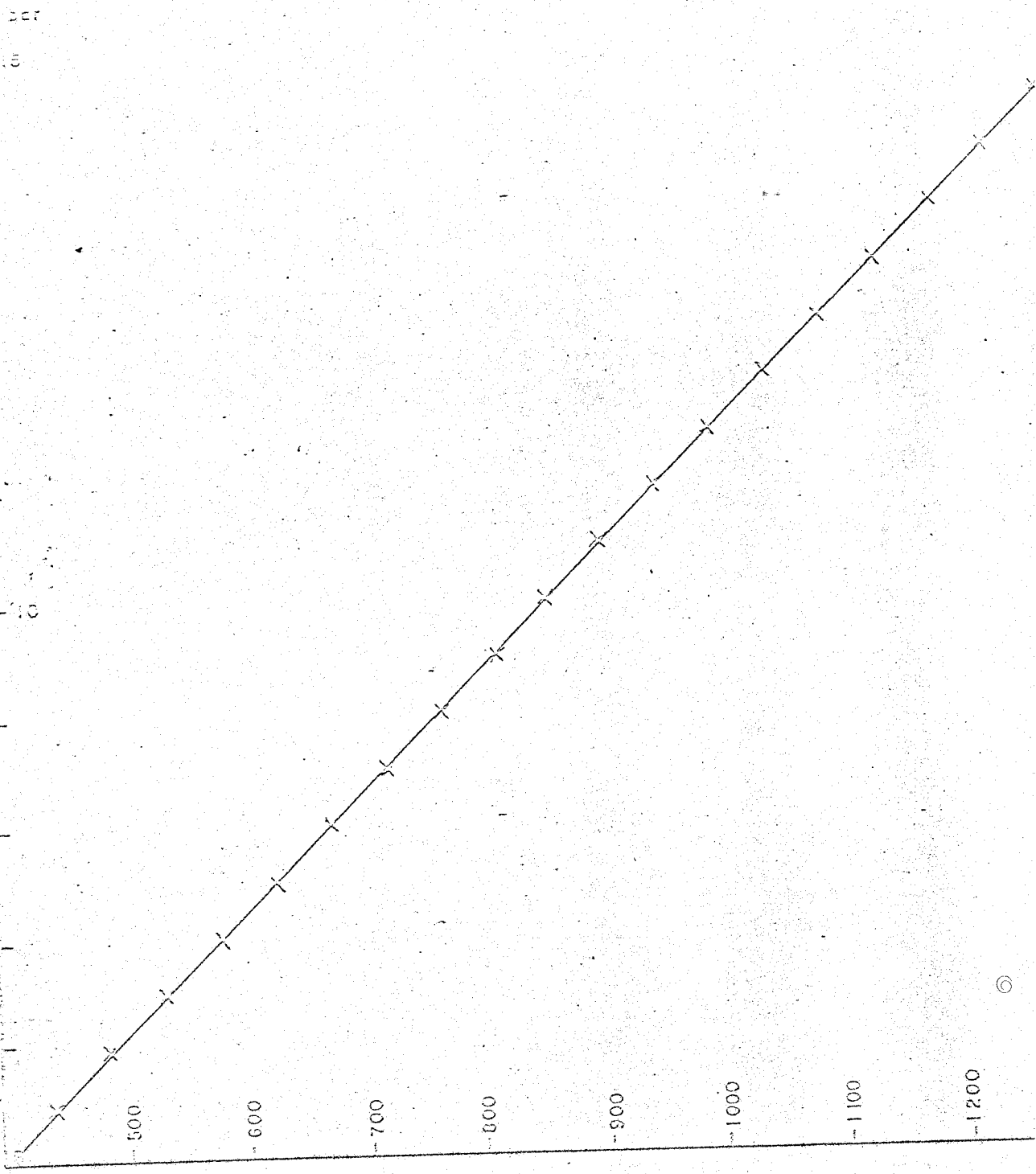
$$P = 10,9735 \text{ e bar/volt} + 0,5722 \text{ bar}$$

onde

P = pressão em bar

e = tensão de saída em V

Na tabela 6.8. estão os diversos pontos obtidos e os valores estimados para o manômetro nesta região com as respectivas diferenças. O maior desvio de linearidade ocorre na pressão 0 bar e é 0,5722 bar. Este erro é atribuído a não linearidade do diodo utilizado na detecção do sinal. Embora isto pudesse ser eliminado, quer por maior amplificação do sinal, que por uma simples compensação, foi julgado satisfatório que o instrumento respondesse de 1 a 20 bar, isto é, desprezou-se os 5% ini



RESPOSTA ELÉTRICA DO MANÔMETRO DE MEMBRANA ESPÉSSA: 5 a 15 bar

( FIG-6.7 )

TABELA 6.5.

TENSÃO DE SAÍDA mV	PRESSÃO INDICADA bar	PRESSÃO ESTIMADA bar	DESVIO bar
397,1	5,00	4,98	0,02
442,3	5,50	5,47	0,03
487,9	6,00	5,96	0,04
533,9	6,50	6,48	0,02
584,4	7,00	7,01	0,01
630,7	7,50	7,51	0,01
678,2	8,00	8,02	0,02
724,9	8,50	8,53	0,03
772,3	9,00	9,04	0,04
818,3	9,50	9,54	0,04
861,6	10,00	10,01	0,01
906,3	10,50	10,48	0,02
952,3	11,00	10,99	0,01
998,6	11,50	11,50	0,00
1047,1	12,00	12,02	0,02
1091,3	12,50	12,50	0,00
1137,7	13,00	13,00	0,00
1185,3	13,50	13,51	0,01
1229,0	14,00	13,99	0,01
1274,2	14,50	14,48	0,02
1319,6	15,00	14,97	0,03

TABELA 6.6.

TENSÃO DE SAÍDA mV	PRESSÃO INDICADA bar	PRESSÃO ESTIMADA bar	DESVIO bar
		1,08	0,08
48,1	1,00	1,63	0,03
87,1	1,50	1,98	0,02
128,5	2,00	2,47	0,03
172,8	2,50	2,98	0,04
217,2	3,00	3,43	0,07
260,0	3,50	3,97	0,03
309,8	4,00	4,45	0,04
354,0	4,50	4,93	0,07
397,1	5,00	5,43	0,07
442,3	5,50	5,93	0,07
487,9	6,00	6,45	0,04
535,9	6,50	6,99	0,01
584,4	7,00	7,50	0,00
630,7	7,50	8,02	0,02
678,2	8,00	8,53	0,03
724,9	8,50	9,03	0,05
772,3	9,00	9,55	0,05
818,3	9,50	10,03	0,03
861,8	10,00	10,51	0,01
905,3	10,50	11,03	0,03
952,8	11,00	11,55	0,03
999,8	11,50	12,07	0,07
1047,2	12,00	12,55	0,03
1091,0	12,50	13,05	0,03
1137,7	13,00	13,55	0,03
1185,8	13,50	14,03	0,03
1229,0	14,00		

6



cont.

TABELA 6.6.

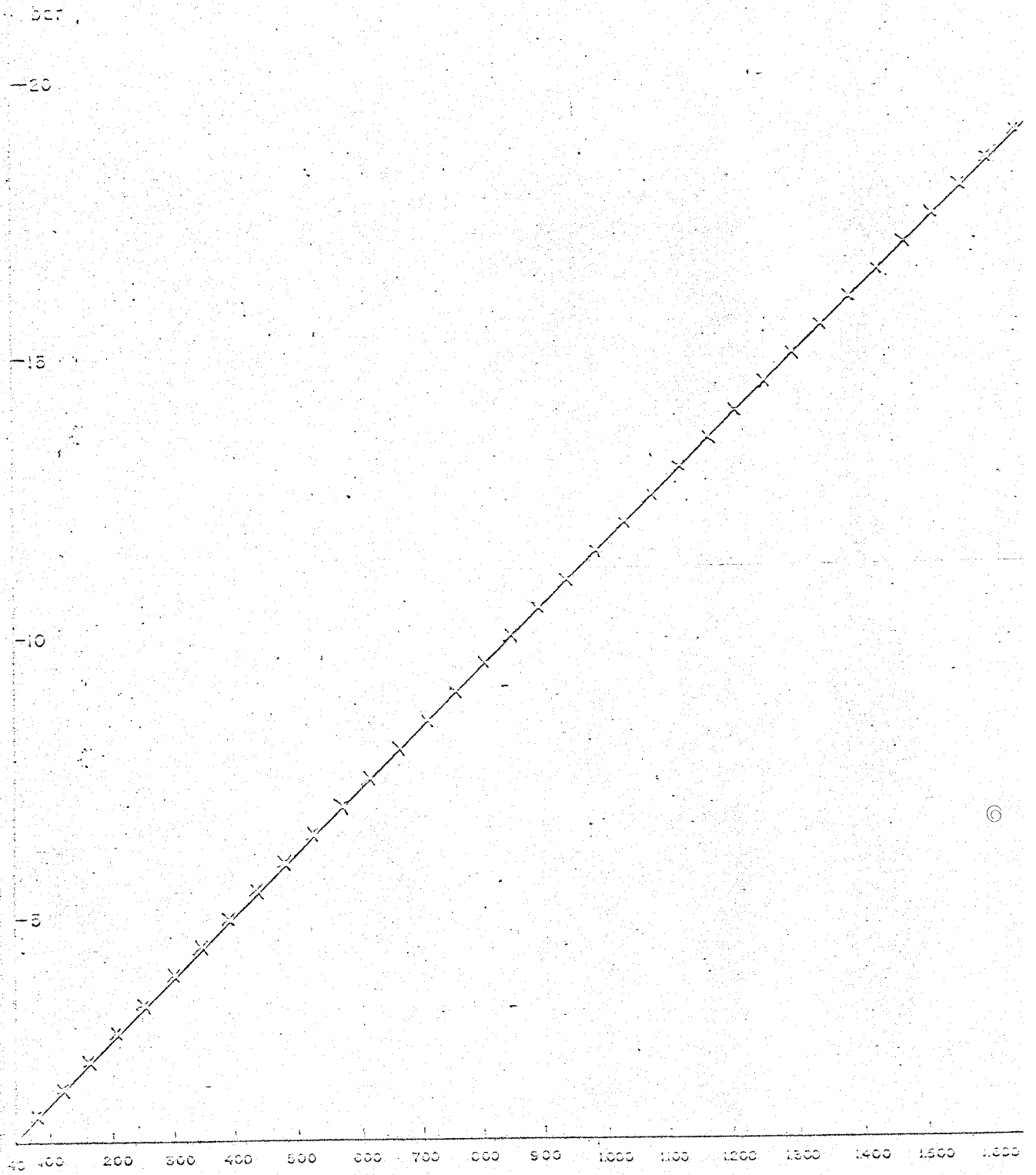
TENSÃO DE SAÍDA mV	PRESSÃO INDICADA bar	PRESSÃO ESTIMADA bar	DESVIO bar
1274,2	14,50	14,55	0,05
1319,3	15,00	15,05	0,05
1362,5	15,50	15,53	0,03
1409,6	16,00	16,05	0,05
1452,8	16,50	16,52	0,02
1496,5	17,00	17,00	0,00
1540,1	17,50	17,48	0,02
1584,7	18,00	17,97	0,03
1628,6	18,50	18,45	0,05
1671,7	19,00	18,92	0,08
1713,9	19,50	19,39	0,11
1755,5	20,00	19,84	0,16

ciais da sua escala. O maior desvio de linearidade observado foi em  
tão baixa de 0,184 bar, à pressão de 20 bar, o que equivale a 1,5 %  
do valor médio da escala. Pela figura 6.8. vê-se que a pressão acima  
de 20 bar haverá um aumento progressivo do desvio. Este aumento é mo-  
tivado pelo termo em  $\delta^3$  da equação (2.3)

#### 6.4. Comparação dos instrumentos

Comparando o desempenho dos dois instrumentos, a superioridade do ma-  
nômetro de membrana espessa sobre o de fole é bastante acentuada. A maior  
falha apresentada pelo manômetro de fole é devida à histerese criada pelo  
atrito mecânico inerente ao instrumento. Se for considerado que o atrito  
depende do estado de superfícies que estão sujeitas ao desgaste e ao con-  
tato com o fluido cuja pressão está sendo medida, vê-se que a precisão da  
resposta neste instrumento deverá ser susceptível ao seu envelhecimento.  
Estes problemas foram praticamente eliminados no manômetro de membrana es-  
pessa pela ausência de atrito mecânico entre partes móveis. Além disto, o  
material empregado em sua confecção permite seu uso em condições mais se-  
veras que o de fole, tanto quanto à sobrecarga quanto à corrosão.

Tanto a operação quanto a fabricação dos dois instrumentos indicam  
que o manômetro de membrana espessa é o mais conveniente sobre todos os - ⑥  
pontos examinados para sua confecção no IPR.



RESPOSTA ELÉTRICA DO MANÔMETRO DE MEMBRANA ESPÉSSA 1 a 20 bar

( FIG-5.8 )

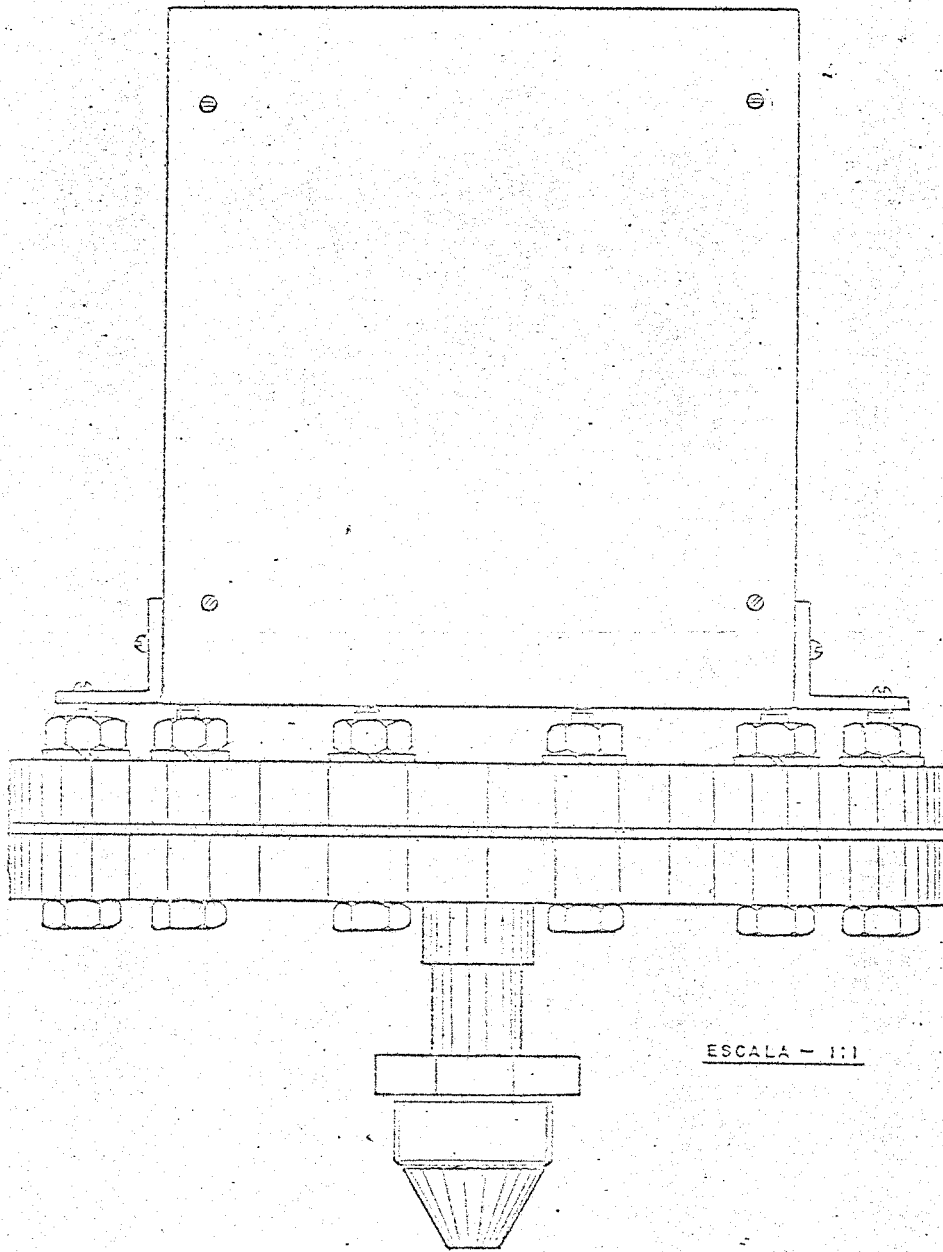
6

Considerando sua aplicabilidade e possibilidade de fabricação no IPR, podem ser destacadas as seguintes características do manômetro de membrana espessa, cuja montagem final está na figura 7.1.

1. Ausência de componentes especiais, como "strain gauge", e também de técnicas de confecção elaboradas, como prensas, matrizes, etc. O manômetro pode ser construído utilizando-se um torno comum, a partir de materiais convencionais, tais como aço inoxidável, bronze ou latão. O transformador diferencial é enrolado em bobinadeira convencional. 6

2. Pode ser calculado teoricamente a partir de fórmulas simples que são bem representativas em quaisquer gamas de pressão, desde 1 até milhares de bar com dimensões modestas.

3. Os efeitos de temperatura (dilatação) são cancelados desde que se use um só material para o corpo do manômetro e suporte do núcleo, e desde que a resistência de entrada do amplificador seja muito maior que a do cobre do enrolamento, requisitos fáceis de preencher. Outrossim a grande espessura da membrana e a ausência de soldas garantem uma montagem sem pré-tensionamento e deformação que poderiam afetar o desempenho.



MONTAGEM FINAL DO MANÔMETRO  
DE MEMBRANA ESPÉSSA

(FIG-7.1)

4. Tem alta velocidade de resposta dada a grande rigidez e pequena deslocamentos envolvidos. Além disto, tem resolução infinita, excelente linearidade, histerese nula, ausência de partes que se desgastem ou atri-tem, grande robustez mecânica e elétrica, capacidade de suportar grandes sobrecargas e dado o grande sinal de saída é pouco susceptível a interfe-rências elétricas ou mecânicas, bem como flutuações do transdutor e da ele-trônica.

5. A eletrônica envolvida é extremamente simples dado o alto sinal de saída, da ordem 1 V, quando um "strain gauge" daria um sinal cêrca de mil vêzes menor. Isto resulta em baixo custo, facilidade de construção e calibração aliada à alta confiabilidade, além de propiciar seu emprego di-reto em detetores de êrro destinados a contrôle automático.

6. O custo do instrumento é bastante baixo quando comparado com seus congêneras. A quantidade de aço empregada em sua confecção é cêrca de 1,5kg e o circuito eletrônico tem seu custo reduzido pela simplicidade e pequeno número dos componentes nele empregados.

Considerando o exposto, recomenda-se êste instrumento para medidas de pressões no Circuito Térmico nº 1.

## BIBLIOGRAFIA

- | 1 | - BAUWEISTER, Theodore & MARKS, Lionel, S. ed. Mechanical Engineers' Handbook, New York, McGraw-Hill, 1955.
- | 2 | - BECKWITH, T.G. & BUCK, N. Lewis. Mechanical Measurements, Reading, Mass, Addison Wesley, 1955.
- | 3 | - SLH ELECTRONICS INC., Waltham. SR-4 Semiconductors Strain Gages. Waltham. 1970 (Bulletin 102-2)
- | 4 | - BOSSIS, A.G. Design of differential Transformers Displacement Gauges, SESA Proceedings, Westport, 9(2):171, 184. 1952.
- | 5 | - BRACHET, Roland, et alii. "Extensometres à Fil Résistant" In : Techniques de l'Ingénieur, Paris, 1953, Sv. il.v.9, t.2, p.E 2200-1-18.
- | 6 | - BRASIL. Departamento de Imprensa Nacional. Unidades de Medida/Brasil, 1969.
- | 7 | - CONSIDINE, Douglas M., ed. Process Instruments and Controls Handbook. New York, McGraw-Hill, 1957.

- 8 | - CORDORAN, George F. & PRICE Henry W. Eletrônica, Trad. por Carlos Auto de Andrade e José Gurjão Neto. Rio de Janeiro, Globo, 1951.
- 9 | - DUBBEL, H. Manual del Constructor de Máquinas, Trad. por Carlos Sáenz de Margada. Barcelona, Labor, 1955.
- 10 | - FAIRES, Virgil Moring. Termodinâmica. Trad. por Borisas Cimblaris. Rio de Janeiro, ao Livro Técnico, 1956.
- 11 | - FRIBANCE, Austin E. Industrial Instrumentation Fundamentals. New York, McGraw-Hill, 1952.
- 12 | - GULTON Industries Strain Gage; Gage configurations. Allied Industrial Electronics Catalog, Chicago, nº. 670, 97, 1957.
- 13 | - KLEIN G. & ZELT J.J. Zaalkorg van. Precision Electronics, Trans from Dutch by K.S. Ankersant. New York, Springer Verlag, 1957.
- 14 | - MILLMAN, Jacob & Halkias, Christos C. Electronics Devices and Circuits. New York, McGraw-Hill, 1957.
- 15 | - PERRY, John H., ed. Chemical Engineers' Handbook, New York, McGraw-Hill, © 1953.
- 16 | - SIGHIERI, Luciano & NISHINARI, A. Kioshi Contrôle Automático de Processos Industriais, Instrumentação São Paulo, E. Suher, /s.d./.
- 17 | - TERMAN, Frederick Emmons & PETIT, Joseph Mayo. Electronic Measurements, New York, McGraw-Hill, 1952.
- 18 | - TIMOSHENKO, Stephen P. Resistência dos Materiais, Trad. por José Rodrigues de Carvalho, Rio de Janeiro, ao Livro Técnico, 1950.
- 19 | - TRUXAL, John G., ed. Control Engineers' Handbook, New York, McGraw-Hill, 1958.



DESENVOLVIMENTO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM

MANÔMETRO DE SAÍDA ELÉTRICA PARA O

CIRCUITO TÉRMICO Nº 1 DO IPR

FERNANDO LOBO VAZ DE MELLO

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES  
DA UFMG COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS

Orientador: JOÃO BOSCO DE SIQUEIRA

INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS

UFMG - CNEV

BELO HORIZONTE - MG - BRASIL

MAIO - 1971