

MONITORAÇÃO DE PARTES PERDIDAS EM SISTEMAS DE  
REFRIGERAÇÃO DE REATORES À ÁGUA LEVE

A. Santos, IME

B.J. Olma, GRS

## 1. INTRODUÇÃO

Esta nota descreve os trabalhos relativos a Sistemas de monitoração de partes perdidas para reatores de água leve, desenvolvidos na Companhia de Segurança de Reatores [Gesellschaft für Reaktorsicherheit] - GRS Munique. O trabalho cobre o estudo de problemas básicos decorrentes do exato levantamento e detecção da parte perdida bem como das atividades de pesquisas e desenvolvimento necessários a obtenção de melhores técnicas no campo.

Um sistema típico de monitoração de partes perdidas, o qual é resultado de experiência adquirida em anos passados, é também descrito sucintamente.

A descrição inclui equipamentos eletrônicos, procedimentos operacionais na central nuclear e uma análise dos sinais de "burst" em laboratório especializado.

A nota contém também detalhes relevantes a respeito de sensores, equipamentos eletrônicos, procedimento do operador, análise especial "off line", experiência acumulada na central nuclear, e conclusões.

## 2. SENSORES

São os elementos responsáveis pela detecção dos sinais gerados pelas partes perdidas no sistema de refrigeração dos reatores de água leve.

### 2.1 - Tipos

A maior parte das frequências dos sinais gerados por uma parte perdida estão localizadas na faixa audível.

Para a detecção do sinal de partes perdidas o uso de acelerômetros Piezoelétricos é considerado adequado tanto para Reatores de Água Pressurizada (PWR) quanto para Reatores de Água Fervente (BWR).

### 2.2 - Posição

A localização dos sensores no sistema primário de refrigeração são baseados na experiência de pesquisa no campo. Em um PWR os locais mais prováveis de se encontrar uma

parte perdida são as entradas do gerador de vapor e a parte do vaso de pressão. Mesmo uma peça vinda da bomba principal, muito provavelmente, ficará retida na parte inferior do vaso de pressão, pois é realmente impossível que a mesma atravesse o caroço do reator.

Também, uma parte perdida advinda da parte superior do caroço do reator, após atravessar as tubulações principais do refrigerante, fica retida nas entradas do gerador de vapor, sendo impossibilitada de penetrar no mesmo por causa dos pequenos diâmetros dos tubos de transferência de calor.

A Figura 1 mostra a localização de sensores em um BWR. Os sensores estão localizados em tres níveis na parte de fora do vaso de pressão do reator. Tres sensores, separados de 90°, no mais alto e mais baixo níveis e quatro sensores, separados de 90°, no nível do meio. A Figura 2 mostra a localização dos sensores em um PWR. Existe tres sensores, separados de 120°, nos níveis superior e inferior do vaso de pressão e dois sensores, um no topo e outro no fundo de cada gerador de vapor.

### 2.3 - Instalação

Um sensor pode ser preso de duas maneiras no vaso de pressão do reator:

#### a) Preso por parafuso

Este tipo de montagem, até agora, não foi usado nas centrais da Alemanha Ocidental. A Figura 3 mostra a função de transferência do sensor com este tipo de montagem. Entretanto, a inclinação do sensor relativa a sua área de contato modifica a sua função de transferência.

#### b) Preso por campo Magnético

Este tipo de montagem é normalmente usado nas centrais da Alemanha Ocidental. A maior vantagem deste tipo de montagem é a facilidade de instalação. Também, não é necessária, grandes modificações na superfície de contato. Entretanto, qualquer superfície com grande curvatura, por exemplo a calota do vaso de pressão do reator, tem que ser aplainada na superfície de contato. Isto é mostrado na Figura 4. A função de transferência do sensor com este tipo de montagem é mostrada na Figura 6. Com referência ao modelo mola-massa mostrado na mesma figura pode-se ver que este tipo de montagem acrescenta uma ressonância adicional nas proximidades da frequência de 8 KHz. Apesar da frequência de ressonância diferir para diferentes sensores ela varia normalmente entre 4 a 12 KHz, podendo assumir 8 KHz como sendo um valor típico. Outro problema é a modificação da frequência de ressonancia como o tempo. Como um exemplo típico, esta frequência pode ser mudada de cerca de 0,2KHz da partida a operação a plena carga do reator. Mesmo durante a operação normal do reator tal modificação

na frequência de ressonância, com o tempo, está presente devido a mudança na força magnética de atração no contato, por causa da camada de óxido criada na região da superfície do mesmo.

### 3. PROCESSAMENTO DO SINAL ELETRÔNICO

A análise do sinal é feita por dois caminhos diferentes descritos abaixo:

#### 3.1 - Análise "In situ" na central nuclear

O diagrama em bloco de um sistema típico de monitoração de partes perdidas na Alemanha Ocidental é mostrado na Figura 6. É interessante notar que a unidade de alarme possui nível de disparo fixo ou variável. Este dispositivo é necessário levando-se em conta as mudanças no nível de ruído de fundo. Por outro lado, um nível de disparo fixo, a carreta em se ter alarmes falsos. Este aspecto é discutido em detalhes em outra parte desta nota.

#### 3.2 - Análise "Off-Line" no laboratório

A Figura 7 mostra o diagrama em bloco do sistema usado para a análise num laboratório. Esta análise é feita periodicamente por uma organização de pesquisa que é requisitada pelas companhias utilitárias.

### 4. PROCEDIMENTO OPERACIONAL NA CENTRAL NUCLEAR

Normalmente, o chefe do departamento do sistema de monitoração de partes perdidas é o responsável pela operação do sistema. O operador de plantão ouve os sinais de todos os canais, uma vez por dia, e dá entrada num registrador ou protocolo (cerca de 5 minutos todo dia). Quando o sistema de alarme for disparado ou se alguma anormalidade estiver presente no sistema, o operador tem que chamar o chefe do departamento que, grava os sinais em uma fita e informa o próximo operador de plantão das irregularidades observadas. Durante o início de operação do reator o operador apenas escuta os sinais uma vez que o nível do ruído de fundo aumenta abruptamente. Alarmes falsos neste período de operação são inibidos tanto quanto possível.

Por 5 minutos, toda a semana, os sinais dos sensores são gravados numa fita magnética. O operador de plantão é requisitado para manter o registrador dando detalhes de data, tempo, nível da potência, velocidade de bomba, número de bombas em operação, identificação da fita magnética, posição da gravação na fita e outros detalhes relevantes.

Em certos casos (normalmente uma vez em cada 3 ou 4 meses) pessoas ligadas a segurança de reatores visitam a central para fazerem medidas. Estas medidas cobrem detalhes de frequência, valores rms de sinais aleatórios, amplitude de densidades, etc... Estas medidas são gravadas em uma fita e normalmente levadas para o laboratório para uma análise mais minuciosa.

## 5. ANÁLISE ESPECIAL

Esta análise é realizada com a finalidade principal de se interpretar os sinais de "burst" detetados pelo sistema de monitoração de partes perdidas na central nuclear. O método geral cobre a interpretação dos sinais e os testes de impacto que deverão ser discutidos neste item.

### 5.1 - Método de Análise

O método normal de análise consiste em diversas etapas, cada etapa correspondente a um equipamento específico usado na central ou no laboratório.

#### 5.1.1 - Sinais sem "burst"

a) As saídas dos amplificadores de carga em todos os canais são gravadas simultaneamente na fita magnética (14 canais na fita).

b) Os sinais são processados no laboratório. Figuras típicas de ruído de fundo são comparadas com fotografias de formas de onda no domínio do tempo.

Normalmente, osciloscópios de memória ou oscilógrafos são usados com esta finalidade.

c) Posteriormente, os sinais são analisados no domínio da frequência e os resultados comparados com dados de referência. O analisador de espectro é utilizado com este propósito. As curvas de densidade espectral de potência indicam picos devido a rotação de bomba, ressonância dos sensores etc... Mesmo que os sinais estejam normais, devem ser catalogados como subsídio para futuras comparações com respeito ao tempo e sensores.

Normalmente, a vibração dos componentes pertencentes ao sistema de refrigeração do circuito primário gera sinais na frequência inferior a 200 Hz.

#### 5.1.2 - Sinais com "burst"

O método de análise é similar a descrição do item 5.1.1. O conhecimento da real característica de propagação do som na estrutura é necessária para que se possa determinar a porção do sinal correspondente a uma parte perdida.

Os resultados obtidos pela análise de sinais de referência e coleta de dados durante os testes de impacto fornecerão detalhes da propagação e atenuação das ondas sonoras na estrutura.

## 5.2 - Testes de impacto

Estes testes são feitos durante o período de desligamento do reator para se executar medidas de calibração. Os dados necessários para localização de impactos são obtidos durante os testes. Os pontos de impacto são distribuídos em várias posições na estrutura e a resposta dos sensores a um impacto é monitorada. A Figura 8 mostra um esquema típico com os sensores no vaso de pressão do reator, a posição do impacto, e o sinal de saída para cada sensor no domínio do tempo. A velocidade de propagação das ondas na estrutura é necessária para a determinação da posição do impacto.

### 5.2.1 - Velocidade de Propagação das Ondas

A velocidade de propagação da onda é constante para uma frequência particular, para um determinado tipo e espessura de material e um módulo determinado. A velocidade de grupo pode ser medida com dois sensores separados por uma distância  $\Delta s$  (Referência Fig. 9). Se  $\Delta t$  for a diferença de tempo entre o início de dois sinais de "burst" na saída de dois sensores, a velocidade de grupo  $v_g$  é:

$$v_g = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

### 5.2.2 - Posição do Impacto

Para a determinação da posição de impacto os seguintes métodos são utilizados:

#### a) Diferença de tempo

Para um mínimo de três pontos cada um sensor é necessário.

Sejam  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  os tempos aos quais os sinais de "burst" chegam nos três sensores após a execução do impacto. A diferença de tempo entre os sensores 1 e 2 é  $t_2 - t_1 = l_1/v_1 - l_2/v_2$  onde  $l_1$  e  $l_2$  são as diferenças entre o ponto de impacto e os sensores 1 e 2 respectivamente.

A relação  $l_1 - l_2 = v(t_1 - t_2)$  = constante, define a hipérbole I mostrada na Figura 10. Similarmente, a hipérbole II é obtida considerando-se os sensores 1 e 3. A interseção destas duas hipérboles nos fornece o ponto de impacto.

#### b) Amplitude do sinal de "burst"

A Figura 11, mostra a relação entre as amplitudes máximas do sinal de "burst" e a distância quando o meio sinal atravessa o meio. A atenuação da onda é feita exponencialmente,

$$b = b_0 e^{-\lambda s} \quad \text{onde,}$$

$b$  = amplitude máxima do sinal de "burst" em um ponto qualquer da estrutura.

$b_0$  = amplitude máxima do sinal de "burst" no ponto de impacto.

$s$  = distância entre o ponto de impacto e um ponto qualquer da estrutura.

$\lambda$  = fator de atenuação dependente:

- Espessura do material da estrutura.
- Frequência do sinal.
- Número do modo (ou módulo).

Por exemplo:

$$\frac{b}{b_0} = -20\text{db}/6\text{m na calota}$$

$$= -6\text{db}/6\text{m na parte média do vaso de pressão}$$

Se o valor de  $\lambda$  for conhecido o ponto de impacto pode ser determinado utilizando-se o método de triangulação por hipérbole. (Referência Figura 12). Existem sensores nos pontos 1, 2 e 3.

Para os pontos 1 e 2,  $b_1 = b_0 e^{-\lambda s_1}$  e  $b_2 = b_0 e^{-\lambda s_2}$  respectivamente.  $b_1/b_2 = e^{-\lambda(s_1 - s_2)}$  e  $\lambda(s_1 - s_2) = \text{constante}$ .

Esta equação define a hipérbole I. Similrmente, considerando os pontos 1 e 3, a hipérbole II é obtida. O ponto de impacto desconhecido está na interceção das duas

#### c) Método do número do modo (ou módulo)

Algumas vezes, é possível a identificação dos dois modos maiores nos sinais de "burst". A Figura 13 mostra como estes dois modos se parecem. Se a velocidade da propagação de cada módulo for conhecida então:

$v_1 = s/t_1$  e  $v_2 = s/t_2$  onde "s" é a distância entre o ponto de impacto (a ser determinado) e cada sensor.

$$t_2 - t_1 = s/v_2 - sv_1 \quad s = (t_2 - t_1) / (1/v_2 - 1/v_1).$$

Entretanto, se  $s_1$  e  $s_2$  para dois sensores for determinado, a seção de pontos da interceção dos dois círculos centrados nos mesmos e de raios iguais a  $s_1$  e  $s_2$  definirá a região onde o impacto esteve presente. Observa-se entretanto que se a excitação for constante com a frequência, os dois maiores módulos  $a_0$  e  $s_0$  aparecem com amplitudes diferentes a uma certa distância do ponto de impacto.

#### d) Método da inclinação da envoltória

O método estima a posição do impacto. Por exemplo, os dois sinais de "burst" apresentados na Figura 14 mostram a maior inclinação da envoltória correspondente a menor distância. Se sinais de mais de dois sensores forem comparados, é possível se estimar a posição do ponto de impacto.

#### 5.3 - Interpretação dos sinais de "burst"

Para que se possa interpretar sinais de "burst" detectados pelos sensores em uma central nuclear, para posterior análise dos sinais gravados em fita, é necessário alguns conhecimentos da resposta normal do sistema a uma excitação fornecida. Pode-se então fazer pequenas observações a respeito do ruído de fundo do reator. No PWR e BWR o ruído é de faixa larga e estocástico, devido ao escoamento do fluido. Linhas de frequência determinísticas adicionais são resultado de operação das bombas.

A amplitude depende do ponto onde a medida é realizada. Falando estatisticamente, o ruído de fundo possui uma distribuição mostrada na Figura 15. A distribuição em diferentes níveis de potência também é mostrada. O ponto de nível de disparo mostrado na Figura 16 corresponde ao nível de disparo do sistema de alarme. Este é o nível de disparo fixo. Algumas vezes, sob certas condições, a curva de distribuição muda como é mostrada na curva pontilhada da mesma Figura. Nestes casos as amplitudes do ruído de fundo são comparativamente mais altas do que o nível fixo de disparo do alarme fazendo com que o mesmo seja acionado inadvertidamente. Para que seja reduzido os alarmes espúrios, um amplificador de sinal de ganho variável é utilizado no sistema afim de compensar este efeito. Quando o nível de potência do ruído aumenta o ganho do amplificador é reduzido. Isto muda efetivamente o ponto de disparo e os falsos alarmes não são gerados.

#### 6. EXPERIÊNCIA DE OPERAÇÃO NOS REATORES DE POTÊNCIA

Descrevemos, como ilustração, dois tipos de experiência: uma em um BWR e outra em um PWR.

Primeiro, descreveremos entretanto o problema de refração de ondas em descontinuidades nas junções do vaso do reator.

A Figura 17 mostra um número de sinais de "burst" de saída de diferentes sensores colocados em um vaso de um BWR. Estes sinais são devido a um impacto na porção inferior do vaso.

A progressão das ondas através das descontinuidades e suas reflexões podem ser observadas na Figura. O ângulo de reflexão total é dependente da velocidade.

A parte esquerda da Figura 18 mostra uma parte perdida (um parafuso) na calota de um vaso de PWR. A parte perdi

da permanece na calota e gera sinais de "burst" toda vez que choca com a superfície interna da calota.

Os sinais de "burst" estão presentes na saída dos sensores  $M_1$  e  $M_5$ . O tempo relativo ao retardo entre os dois sinais indica que a parte perdida está na porção inferior do vaso de pressão.

A parte direita da Figura 18 nos mostra o movimento de uma parte perdida no gerador de vapor.

Isto produz sinais de "burst" que são detetados pelo sensor localizado na entrada da câmara. A variação na amplitude do sinal de "burst" devido a variação da distância entre os sensores e a parte perdida móvel pode ser observada claramente na seqüência do sinal.

A parte de cima da Figura 19 nos mostra os sinais de "burst" detetados pelos sensores  $M_4$ ,  $M_5$  e  $M_6$  num BWR.

Os sinais são gerados por uma parte solta (não totalmente perdida) logo acima do núcleo nú do reator.

A parte inferior da Figura 19 mostra sinais gerados por uma parte perdida móvel na porção inferior do vaso de um BWR. Os tempos de início e as amplitudes relativas dos sinais de "burst" na saída dos sensores  $M_1$ ,  $M_2$  e  $M_3$  indicam claramente o movimento da parte perdida.

## 7. CONCLUSÃO

Pode-se concluir então que a monitoração de partes perdidas em reatores a água leve é baseada na minuciosa análise advinda da experiência acumulada na investigação de métodos para a correta interpretação dos sinais de "burst".

A detecção de uma parte perdida, sua localização aproximada, a estima de sua forma e peso é baseada no julgamento de pessoal tecnicamente especializado com o auxílio dos equipamentos do sistema. Entretanto, a decisão de desligar ou não o reator é um problema que envolve muitas considerações como segurança da central, fatores econômicos, etc...

A procura de novos métodos e a análise de dados acumulados visa automatizar o sistema no futuro.



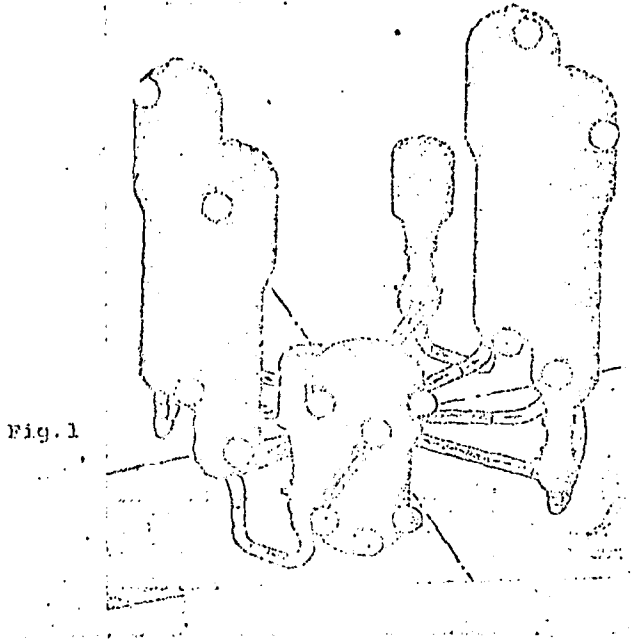


Fig. 1

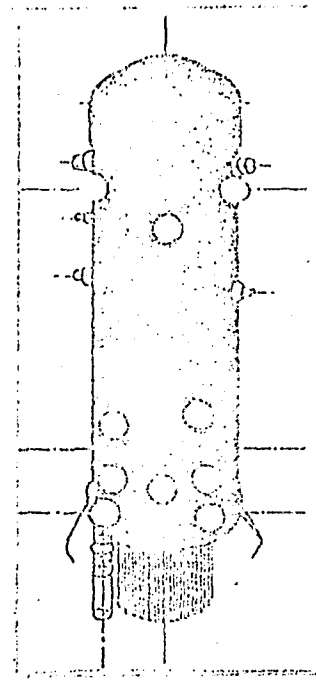


Fig. 2

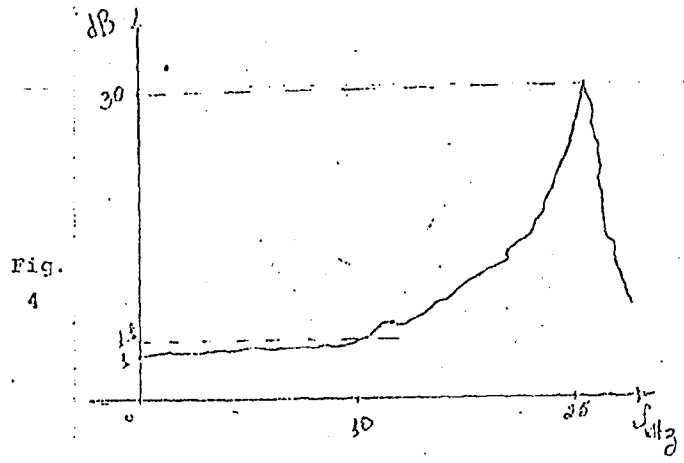


Fig. 4

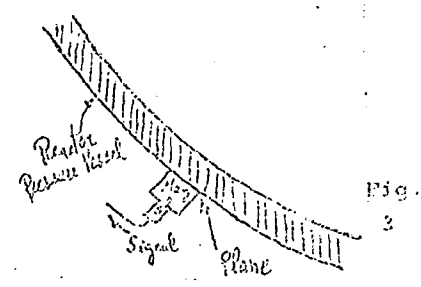


Fig. 3

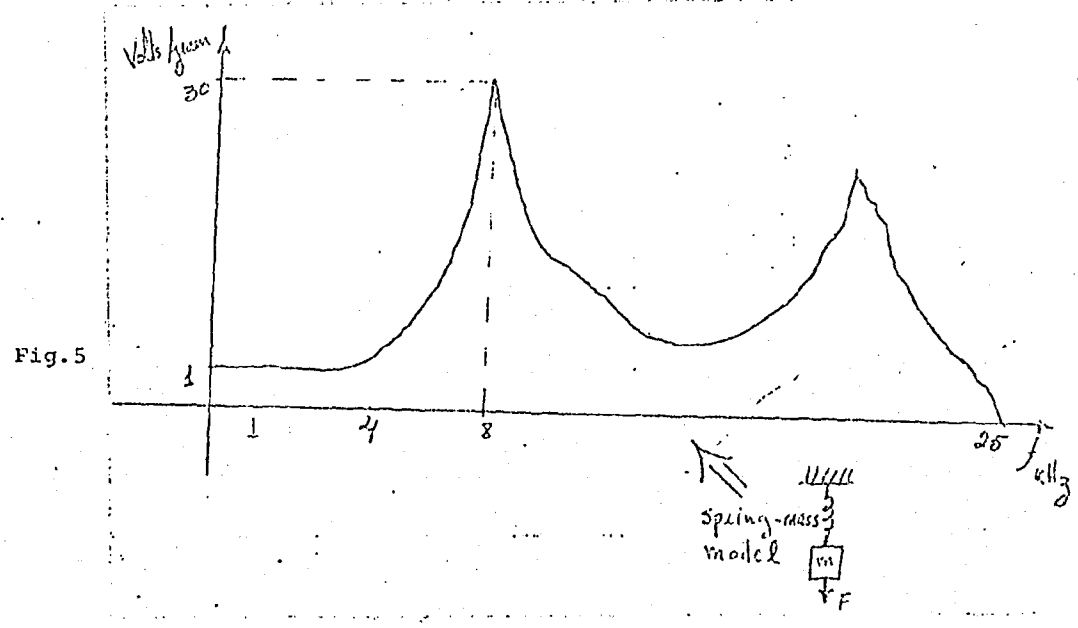
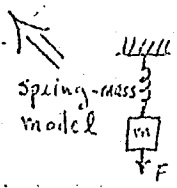


Fig. 5



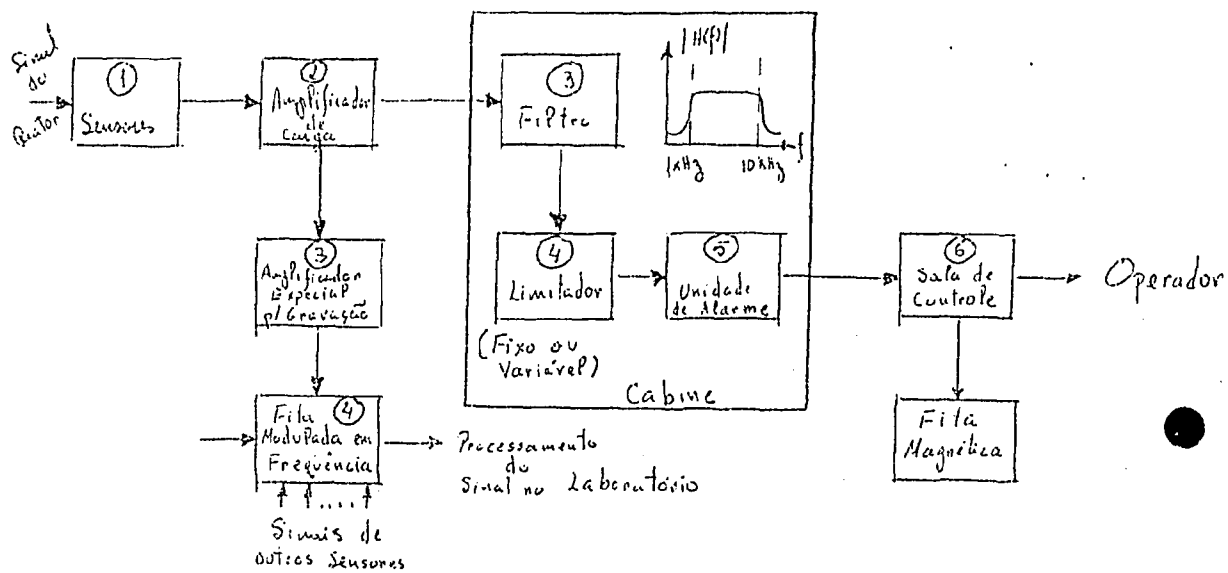


Fig. 6

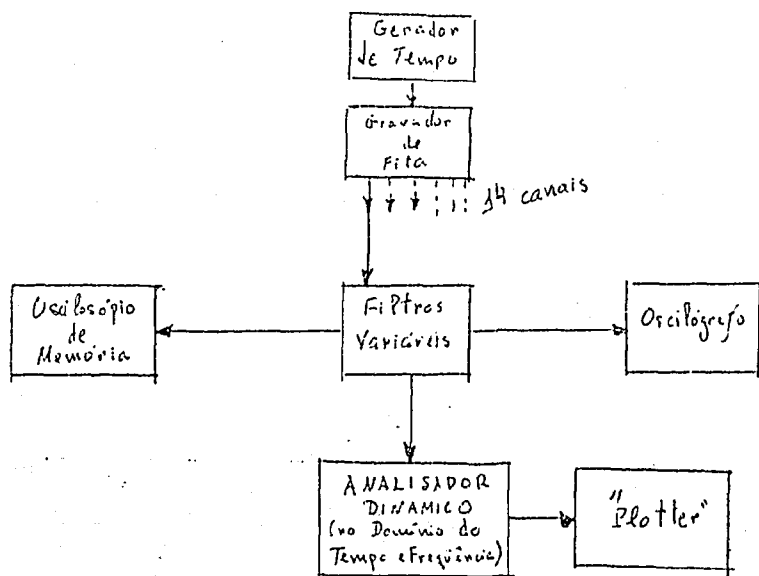


Fig. 7

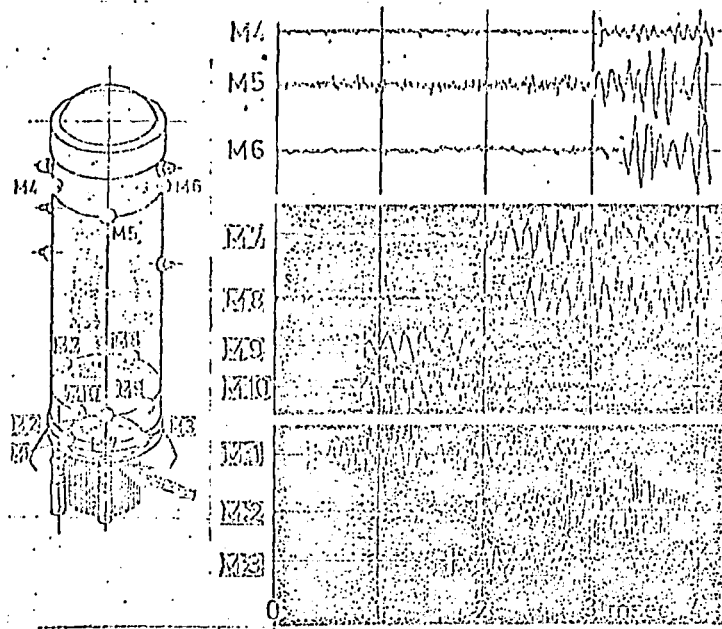


Fig. 8

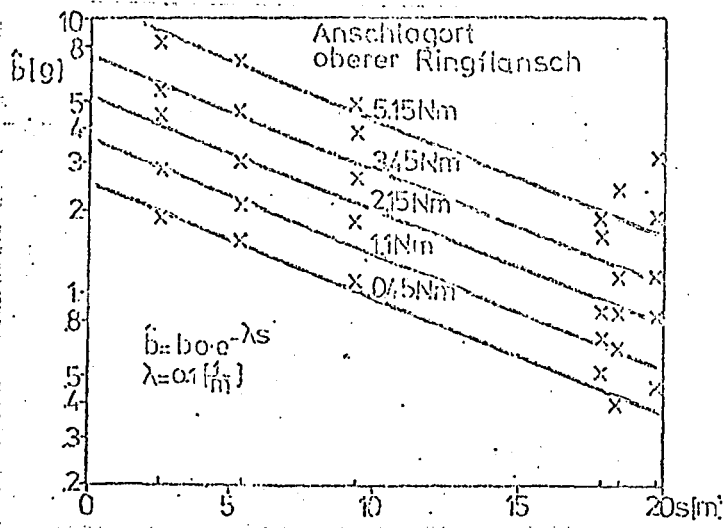


Fig. 11

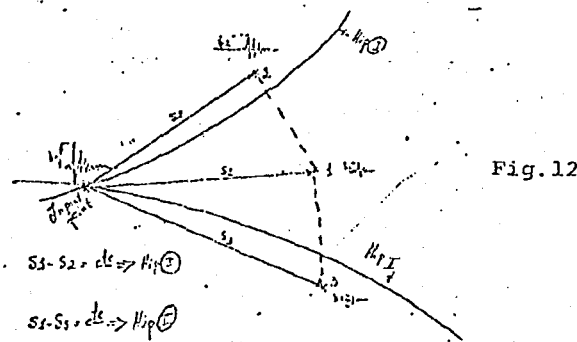


Fig. 12

$$V_{ij} = \frac{1.5}{\Delta t}$$

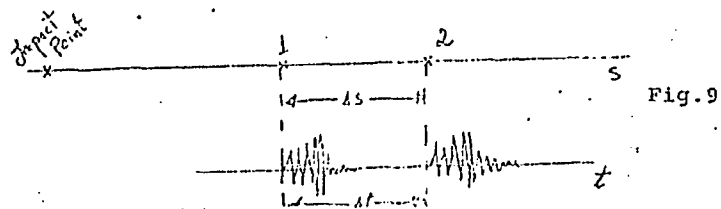


Fig. 9

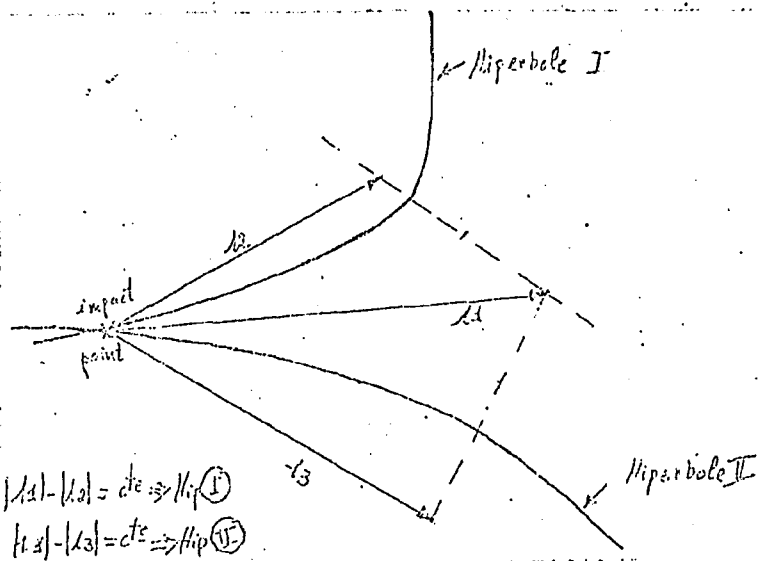


Fig. 10

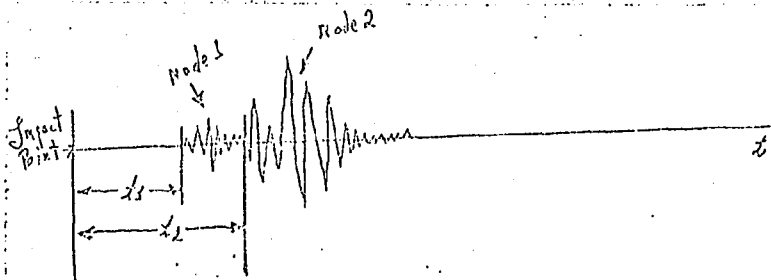


Fig. 13

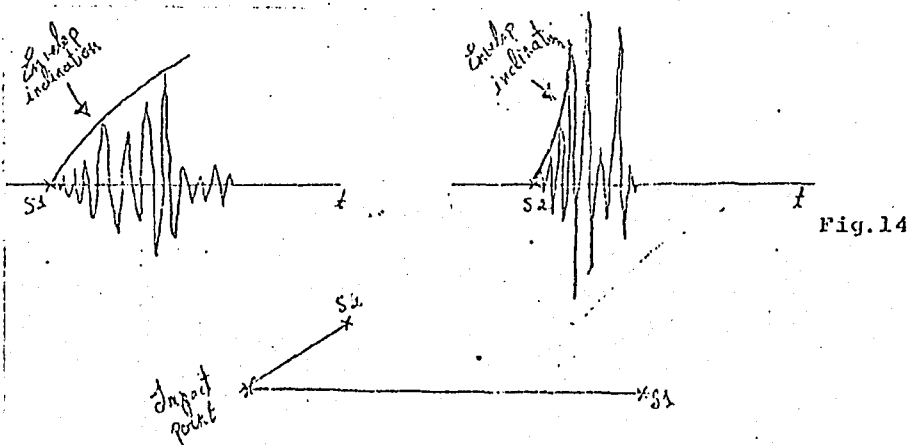


Fig. 14

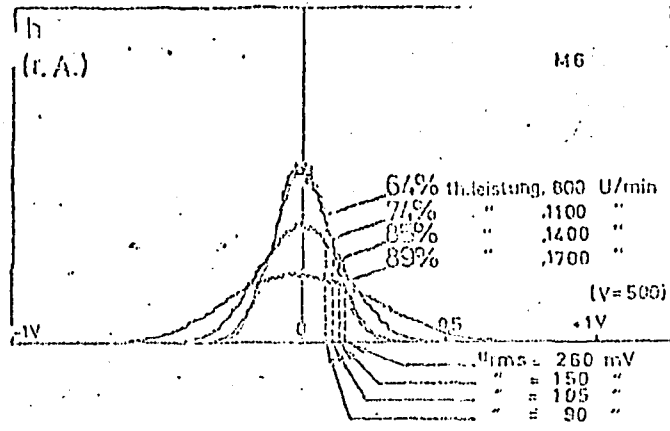


Fig. 15

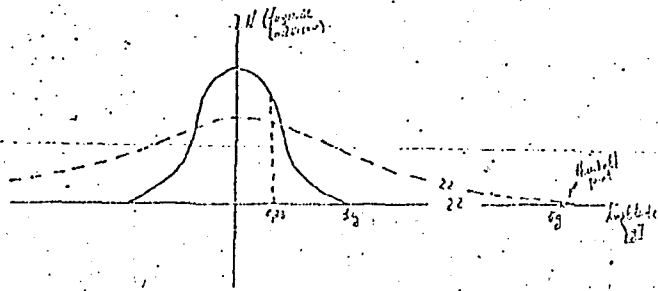


Fig. 16

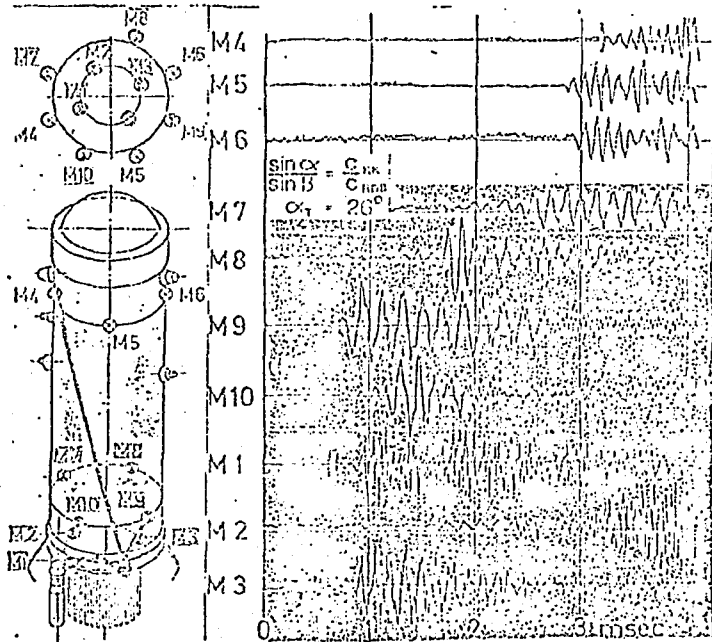


Fig. 17

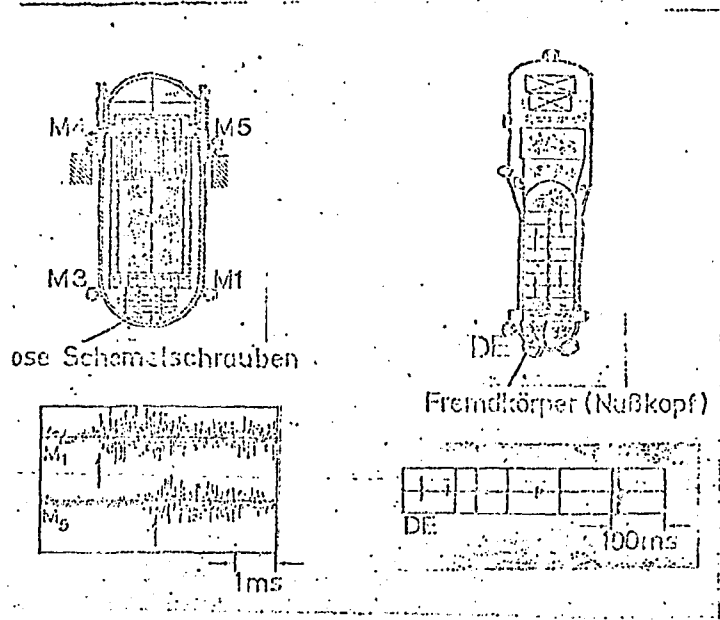


Fig. 18

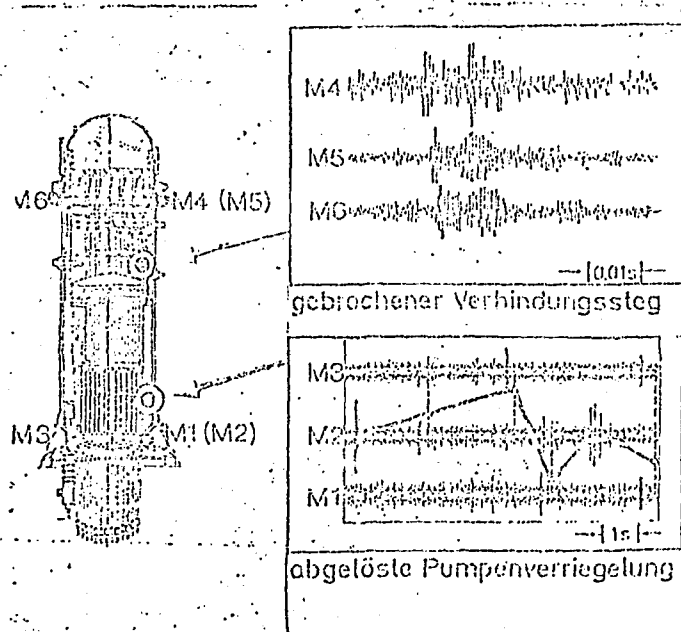


Fig. 19