

BRA 37664
INIS BR - 3558



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

**DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA DE
TRANSDUTORES DE PRESSÃO UTILIZANDO
O MÉTODO DE MEDIDA DIRETA**

SERGIO RICARDO PEREIRA PEREIRA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na
Área de Reatores Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível Nuclear.

Orientador: Prof. Dr. Adalberto José Soares

São Paulo

VOL. 26 Nº 23

1994

11.2:
05

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO
UTILIZANDO O MÉTODO DE MEDIDA DIRETA**

SERGIO RICARDO PEREIRA PERILLO



Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Tecnologia de Reatores de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear

ORIENTADOR: Prof. Dr. Adalberto José Soares, IPEN/CNEN-SP

SÃO PAULO

1994

AOS MEUS PAIS, POR TEREM ME
DADO O DOM DA VIDA, PELO
ESFÓRÇO E DEDICAÇÃO.

À MINHA ESPÔSA PELO APOIO E
CARINHO, SEMPRE CONSTANTES.

AGRADECIMENTOS

À Coordenadoria para Projetos Especiais do Ministério da Marinha (COPESP), pelo apoio e incentivo durante o desenrolar das atividades, contribuindo para a formação do corpo científico existente no país, bem como pelo fornecimento das instalações e equipamentos colocados à disposição, possibilitando a realização deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN/CNEN-SP) pelos cursos ministrados e pela utilização do seu acervo bibliográfico.

Ao Prof. Dr. Adalberto José Soares, pelo coleguismo, orientação e incentivo durante a execução deste trabalho.

Ao Sr. Rubens Lander Pinto, por fabricar e montar o gerador hidráulico de rampa.

Ao amigo e padrinho, Eng. José Carlos de Almeida, pelo auxílio dado durante a fase de ajuste e manutenção do gerador hidráulico de rampa.

Ao Dr. Paulo Rogério Pinto Coelho, pelo incentivo e apoio durante a realização do trabalho

Ao Eng. João Carlos Paschoal de Freitas, Chefe da Seção de Aferição, Calibração e Manutenção de Instrumentação da COPESP, pelo empréstimo dos transdutores utilizados neste trabalho.

Às bibliotecárias do IPEN, pelo auxílio prestado na procura das referências e na formatação da tese na sua forma final.

À Srta. Andrea Paula Masseur pelo auxílio na fotocópia de parte deste trabalho.

Ao amigo MSc. Tufic Madi Filho, pela correção ortográfica do trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Luis Valcov Loureiro (EPUSP) e Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva (IPEN), pelas observações e informações pertinentes a este trabalho.

**DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO
UTILIZANDO O MÉTODO DE MEDIDA DIRETA**

SERGIO RICARDO PEREIRA PERILLO

RESUMO

Neste trabalho são discutidos os diversos métodos para medida de tempo de resposta dos transdutores de pressão ligados ao sistema de proteção de uma central nuclear, e apresentados os resultados obtidos através do método de medida direta. Para a realização das medidas foi utilizado um gerador hidráulico de rampa que permite gerar transientes de pressão dos tipos degrau e rampa gerando, simultaneamente, um sinal de teste para o transdutor analisado e para um transdutor de referência. O tempo de atraso entre a resposta do transdutor analisado e o transdutor de referência é chamado de tempo de atraso do transdutor, e indica quão rápido o transdutor analisado responde a uma variação. Foram analisados, neste trabalho, 11 (onze) transdutores de pressão, todos na faixa entre 25 e 400 KPa, sendo 9 convencionais (de uso na indústria em geral) e 2 produzidos com classe nuclear (para uso em centrais nucleares)

**DETERMINATION OF THE RESPONSE TIME OF PRESSURE TRANSDUCERS
USING THE DIRECT METHOD**

SERGIO RICARDO PEREIRA PERILLO

ABSTRACT

In the present work the available methods to determine the response time of nuclear safety related pressure transducers are discussed, with emphasis to the "direct method". In order to perform the experiments, a "Hidraulic Ramp Generator" was built. The equipment produces ramp pressure transients simultaneously to a reference transducer and to the transducer under test. The time lag between the output of the two transducers, when they reach a predetermined setpoint, is measured as the "time delay" of the transducer under test. Some results using the direct method to determine the time delay of pressure transducers (1E Class and Conventional) are presented.

SUMÁRIO

	PÁGINA
Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
Resumo	iv
Abstract	v
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xii
Capítulo 1 Introdução	1
1.1. Objetivo do Trabalho	4
Capítulo 2 Fundamentos Sobre o Tempo de Resposta	5
2.1. Definição da Constante de Tempo	5
2.2. Definição do Tempo de Atraso	6
2.3. Relação Entre a Constante de Tempo e o Tempo de Atraso	6
2.4. Resposta de um Sistema Linear de Ordem "n" Para Um Sinal de Entrada do Tipo Rampa	10
Capítulo 3 Transdutores Utilizados Para Medida de Pressão em Centrais Nucleares	15
Capítulo 4 Causas e Mecanismos de Degradação do Tempo de Resposta	32
4.1. Degradação dos Sensores	32

4.1.1. Temperatura e Umidade	32
4.1.2. Pressão	33
4.1.3. Fluência (Exposição à Radiação)	35
4.1.4. Manutenção	36
4.2. Degradação das Linhas de Pressão	39
Capítulo 5 Transientes em Centrais Nucleares	42
Capítulo 6 Métodos Utilizados Para Medida e Monitoração do Tempo de Resposta de Transdutores de Pressão	53
6.1. Teste em Rampa	54
6.2. Teste em Degrau	55
6.3. Interrupção de Potência	56
6.4. Análise de Ruído	57
6.5. Vantagens e Desvantagens de Cada Método	59
6.5.1. Método Direto	61
6.5.2. Métodos Indiretos	63
Capítulo 7 Descrição do Gerador Hidráulico De Rampa	69
7.1. Operação do Gerador Hidráulico de Rampa	73
7.1.1. Operação em Modo Rampa	74
7.1.2. Operação em Modo Degrau	76
Capítulo 8 Programa Experimental	79
8.1. Resultados	84
8.2. Análise de Incertezas	91
Capítulo 9 Conclusões e Recomendações	95
Capítulo 10 Referências	109
Capítulo 11 Anexo	113

11.1. Escoamento Adiabático Reversível Unidimensional em Regime Permanente Através de um Bocal	113
Capítulo 12 Anexo	124
12.1. Transformada de Laplace para um Sistema Linear de Ordem "M" com um Sinal de Entrada em Forma de Rampa	124

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
2.1. TESTE EM DEGRAU E A DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE TEMPO	13
2.2. RESPOSTA IDEAL EM RAMPA DE UM TRANSDUTOR	14
3.1. DIFFERENTIAL PRESSURE UNIT UTILIZADA NO ITT/BARTON MODELO 764	25
3.2. TRANSDUTOR ITT/BARTON	26
3.3. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UM TRANSDUTOR DE PRESSÃO COM CÉLULA CAPACITIVA	27
3.4. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM TRANSDUTOR DE PONTE DE RELUTÂNCIAS	28
3.5. CIRCUITO EM PONTE DE UM TRANSDUTOR DE PONTE DE RELUTÂNCIAS	28
3.6. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UM TRANSDUTOR DE PRESSÃO DO TIPO BALANÇO DE FORÇAS	29

FIGURA	PÁGINA
3.7. TRANSDUTOR DA FOXBORO	30
3.8. POTE DE SELAGEM	31
4.1. ESQUEMA TÍPICO DE CONEXÃO DO TRANSDUTOR AO PROCESSO	41
5.1. TRANSIENTE NO PRESSURIZADOR DEVIDO A RETIRADA ACIDENTAL DAS BARRAS DE CONTROLE (10 PCM/S)	46
5.2. TRANSIENTE NO PRESSURIZADOR DEVIDO A RETIRADA ACIDENTAL DAS BARRAS DE CONTROLE (65 PCM/S)	47
5.3. TRANSIENTE GERADO PELA DESPRESSURIZAÇÃO ACIDENTAL DO PRESSURIZADOR	48
5.4. TRANSIENTE NA CÂMARA DE CONTENÇÃO (CD=0.4)	49
5.5. TRANSIENTE NA CÂMARA DE CONTENÇÃO (CD=0.6)	50
5.6. TRANSIENTE NA CÂMARA DE CONTENÇÃO (CD=1.0)	51

FIGURA	PÁGINA
5.7. TRANSIENTE NO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO NÚCLEO DO REATOR DEVIDO AO BLOQUEIO DO ROTOR DE UMA DAS DUAS BOMBAS PRINCIPAIS	52
6.1. TEMPO DE RESPOSTA DE UMA CADEIA DE INSTRUMENTAÇÃO	65
6.2. COMPARAÇÃO ENTRE TESTE PI E TESTE EM DEGRAU	66
6.3. PROCEDIMENTO UTILIZANDO-SE ANÁLISE DE RUÍDO	67
6.4. RESULTADO TÍPICO DE UM TESTE PI	68
7.1. ESQUEMA SIMPLIFICADO DO GERADOR HIDRÁULICO DE RAMPA	77
7.2. VISÃO GERAL FRONTAL DO GERADOR HIDRÁULICO DE RAMPA	78
7.3. VISÃO GERAL INTERNA DO GERADOR HIDRÁULICO DE RAMPA	78
8.1 ARRANJO EXPERIMENTAL (I)	92
8.2 ARRANJO EXPERIMENTAL (II)	93
8.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PRESSÃO	94

FIGURA	PÁGINA
9.1. TRANSDUTOR LD300 COM "TEMPO MORTO" - TRANSIENTE DO TIPO RAMP A DE PRESSÃO	104
9.2. TRANSDUTOR LD200 COM RESPOSTA NORMAL - TRANSIENTE DO TIPO RAMP A DE PRESSÃO	105
9.3. TRANSDUTOR LD300 COM "TEMPO MORTO" - TRANSIENTE DO TIPO DEGRAU (POSITIVO) DE PRESSÃO	106
9.4. TRANSDUTOR LD200 COM RESPOSTA NORMAL - TRANSIENTE DO TIPO DEGRAU (POSITIVO) DE PRESSÃO	107
9.5. TRANSDUTOR LD300 COM "TEMPO MORTO" - TRANSIENTE DO TIPO DEGRAU (NEGATIVO) PRESSÃO	108
9.6. TRANSDUTOR LD200 COM RESPOSTA NORMAL - TRANSIENTE DO TIPO DEGRAU (NEGATIVO) DE PRESSÃO	109
11.1. ESCOAMENTO ADIABÁTICO REVERSÍVEL UNIDIMENSIONAL EM REGIME PERMANENTE ATRAVÉS DE UM BOCAL	114

LISTA DE TABELAS

TABELA	PÁGINA
3.1. PRINCIPAIS TRANSDUTORES DE PRESSÃO LIGADOS AO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA USINA DE ANGRA I	16
4.1. EFEITOS QUE PODEM CAUSAR DEGRADAÇÃO NO TEMPO DE RESPOSTA DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO	37
5.1. SEQUÊNCIA DE EVENTOS PARA UM ACIDENTE POR GRANDE RUPTURA DO CIRCUITO PRIMÁRIO	44
6.1. COMPARAÇÃO QUALITATIVA ENTRE OS TESTES DE DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO	54
8.1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS TRANSDUTORES ANALISADOS	81
8.2. TEMPO DE ATRASO DOS TRANSDUTORES ANALISADOS	86
8.3. CONSTANTE DE TEMPO PARA DEGRAUS POSITIVOS E NEGATIVOS DE PRESSÃO	87
8.4. RESULTADOS DO TESTE PI	88

TABELA**PÁGINA**

8.5. INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE DAMPING NO TEMPO DE RESPOSTA	89
8.6. INFLUÊNCIA DO POTE DE SELAGEM NO TEMPO DE RESPOSTA	90
8.7. INFLUÊNCIA DE BÔLHAS DE AR NO TEMPO DE RESPOSTA	90
9.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE RESPOSTA OBTIDOS	100

1 INTRODUÇÃO

As condições de operação e os limites a que uma instalação está sujeita durante um transiente são determinadas na fase de projeto, quer esta instalação seja nuclear ou convencional.

Para monitorar as condições das variáveis dinâmicas e mantê-las sob controle, garantindo que estas não excedam os limites de segurança, são instalados medidores ao longo do processo. Estes medidores convertem o valor das variáveis de processo em sinais mensuráveis, tornando possível quantificar o valor da variável monitorada.

O fato de a resposta do transdutor* a uma variação do valor da variável monitorada não ser instantânea, significa que a informação indicada pelo transdutor não representa, necessariamente, o valor verdadeiro daquela variável a ele associada naquele instante. O intervalo de tempo entre o instante em que a variável alcança um determinado valor e o instante em que o transdutor alcança aquele mesmo valor é definido como o tempo de resposta daquele instrumento. No caso específico da grandeza física "pressão", estes medidores são

* No Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa (2.a Edição) encontramos o seguinte significado para a palavra transdutor:

"Qualquer dispositivo capaz de transformar um tipo de sinal em outro tipo, com o objetivo de transformar uma forma de energia em outra, possibilitar o controle de um processo ou fenômeno, realizar uma medição, etc".

chamados de transdutores, e servem como uma interface entre o operador e a variável monitorada, podendo ser vistos, neste caso, como uma combinação de dois sistemas: um mecânico e um eletrônico. O sistema mecânico de um transdutor de pressão contém um elemento sensor elástico (diafragma, fole ou tubo), que flete com a pressão, convertendo variação de pressão em deslocamento, que por sua vez é detectado pelo sistema eletrônico que se encarrega de converter o movimento em um sinal elétrico mensurável.

Devido ao ambiente hostil em que muitos transdutores estão localizados, os seus componentes podem sofrer alterações com o tempo, mais especificamente com a fluência neutrônica* (1). Consequentemente, suas características dinâmicas podem ser alteradas. Geralmente, a sua resposta fica mais lenta, e se a degradação for grande, o tempo de resposta pode superar os valores estabelecidos na especificação técnica da instalação, colocando em risco a segurança do pessoal envolvido e da própria instalação.

Outros fatores, além da fluência, podem afetar as características dinâmicas de um transdutor, como observado por Hashemian (2), que mostrou que um transdutor de pressão pode ter o seu desempenho alterado pela temperatura do ambiente, por ciclos de pressão, vibração, umidade e sobre-pressão** .

* Integração do fluxo neutrônico no tempo

** A "sobre-pressão" ocorre quando o transdutor é submetido a pressões que estão acima da sua faixa normal de trabalho.

Para evitar que a degradação de um transdutor comprometa a segurança de uma instalação nuclear, a partir de 1977 com a publicação do "Nuclear Regulatory Guide 1.118" (3), a "U.S. Nuclear Regulatory Commission" estabeleceu regras para a determinação do tempo de resposta de sensores, e a partir de então, foram adotados procedimentos de testes baseados em normas (4,5), que exigem explicitamente que as usinas nucleares possuam um programa de testes periódicos para monitoração do tempo de resposta dos transdutores ligados ao sistema de proteção da instalação. O objetivo do programa é garantir que o tempo de resposta dos canais de segurança do reator permaneça dentro dos limites estabelecidos nas especificações técnicas da instalação. Segundo as normas, os testes devem ser feitos "in-situ", ou seja, com o transdutor instalado no local de operação normal. Quando isto não for possível, a medida deve ser feita em laboratório, mantendo porém as condições ambientais do teste as mais fiéis possíveis àquelas dos locais de trabalho dos transdutores.

1.1 - OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho objetiva o estudo de um método utilizado para a determinação do tempo de resposta de transdutores de pressão utilizados em canais de segurança de centrais nucleares. O método, conhecido como método direto, utiliza uma bancada portátil, com a qual é possível gerar sinais de pressão do tipo rampa e degrau. É importante salientar que este método exige acesso direto ao instrumento, sendo necessário portanto que a instalação esteja desligada, ou que o instrumento seja retirado para a realização dos testes em laboratório.

2 FUNDAMENTOS SOBRE TEMPO DE RESPOSTA

O termo "tempo de resposta" representa apenas uma definição qualitativa. A sua quantificação necessita dados mais explícitos sobre o transiente aplicado e o tipo de sistema analisado.

2.1 - DEFINIÇÃO DA CONSTANTE DE TEMPO

No caso de se utilizar o teste em degrau, determina-se um parâmetro denominado de constante de tempo. Esta constante de tempo é definida como o tempo necessário para que o sinal de saída do instrumento alcance 63.2% de um transiente aplicado na forma de um degrau, conforme ilustrado na Figura 2.1. A priori a constante de tempo é definida apenas para sistemas lineares de primeira ordem, porém nada impede que ela seja utilizada no estudo de outros sistemas dinâmicos, desde que explicitada a sua definição.

2.2 - DEFINIÇÃO DO TEMPO DE ATRASO

No caso de se utilizar um transiente em forma de uma rampa o parâmetro analisado é denominado de tempo de atraso, e é definido como o atraso assintótico entre a resposta de um transdutor de referência e um transdutor sob investigação, quando submetidos simultaneamente a um sinal de entrada em rampa, conforme ilustrado na Figura 2.2.

2.3 - RELAÇÃO ENTRE A CONSTANTE DE TEMPO E O TEMPO DE ATRASO

A relação entre a constante de tempo e o tempo de atraso, para um sistema linear de primeira ordem pode ser mostrada através do que chamamos de função de transferência $G(s)$ do sistema, que relaciona o sinal de saída $C(t)$ com o sinal de entrada $R(t)$, devidamente convertidas para o domínio de Laplace. Neste caso a função de transferência pode ser expressa pela equação:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\sigma s + 1} \quad (2.1)$$

onde σ é a constante de tempo do transdutor e s é a variável da transformada de Laplace.

Como a transformada de Laplace para um degrau unitário é $1/s$, substituindo $R(s)$ na equação 2.1, obtemos:

$$C(s) = \frac{1}{(\sigma s + 1)} \left(\frac{1}{s} \right) \quad (2.2)$$

expandindo $C(s)$ em frações parciais, temos:

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{\sigma}{\sigma s + 1} \quad (2.3)$$

Tomando a transformada inversa de Laplace da equação 2.3, obtemos

$$C(t) = 1 - e^{-t/\sigma} \quad (t \geq 0) \quad (2.4)$$

Note-se que para o tempo $(t) = \sigma$, a equação 2.4 nos dará como resultado o valor que define a constante de tempo:

$$C(t = \sigma) = 0.632 \quad (2.5)$$

Se ao invés de aplicarmos um degrau, aplicarmos uma rampa, cuja transformada da Laplace é $1/s^2$, obtemos a saída do sistema como sendo:

$$C(s) = \left(\frac{1}{\sigma s + 1} \right) \frac{1}{s^2} \quad (2.6)$$

novamente, expandindo $C(s)$ em frações parciais, temos:

$$C(s) = \frac{1}{s^2} - \frac{\sigma}{s} + \frac{\sigma^2}{\sigma s + 1} \quad (2.7)$$

Tomando a transformada inversa de Laplace da equação 2.7, obtém-se:

$$C(t) = t - \sigma + \sigma e^{-t/\sigma} \quad (t \geq 0) \quad (2.8)$$

Quando $t \gg \sigma$ a relação pode ser aproximada por:

$$C(t \gg \sigma) = (t - \sigma) \quad (2.9)$$

O que significa que o tempo de atraso (τ) é igual a σ após decorrido tempo suficiente para que a exponencial decaia, ou seja $\tau = \sigma$.

De uma maneira geral, os transdutores de pressão podem ser aproximados por sistemas dinâmicos lineares de segunda ordem. Neste caso estes transdutores devem apresentar como resposta a um estímulo de pressão na forma de uma rampa, um sinal semelhante ao de entrada, defasado de um valor " τ " que independe da inclinação da rampa do sinal de entrada (6,7), como veremos a seguir. Na prática, entretanto, isto nem sempre ocorre, devido ao comportamento altamente não linear de alguns transdutores, causado por limitadores físicos de movimento e pela forma como o sinal é processado eletronicamente em alguns transdutores.

Entretanto, por não serem sistemas lineares de primeira ordem, a aplicação de um teste em degrau deve ser feito com reserva, de modo a se obter parâmetros qualitativos do tempo de resposta do instrumento.

O teste em degrau pode, por exemplo, ser utilizado para determinar o parâmetro denominado "time-to-trip", que é definido como a diferença de tempo entre o início de um transiente do tipo degrau e o instante em que um dispositivo de proteção colocado no final da cadeia de instrumentação é acionado. Este teste é útil para verificar o perfeito funcionamento de equipamentos elétricos da cadeia eletrônica, que envolve sinalizadores (sonoros e visuais) e atuadores, tais como, relés, bi-estáveis e outros dispositivos de proteção.

Os valores obtidos a partir do "time-to-trip" e da constante de tempo, geralmente podem ser vistos como estimativas conservativas do teste em rampa.

Conforme já mencionado, além de não serem sistemas lineares de primeira ordem, alguns transdutores apresentam também um comportamento não linear, portanto, para a aplicação do teste em rampa recomenda-se que sejam aplicadas duas rampas distintas: a primeira (suave) é baseada no transiente mais lento, e a segunda (rápida) baseada no mais rápido transiente a que o sistema de proteção deve ser submetido, no caso da ocorrência de um acidente, ou seja baseado nos transientes que são postulados na fase de projeto da instalação nuclear, e que fazem parte do seu relatório de análise de segurança, como veremos no Capítulo 5.

2.4 - RESPOSTA DE UM SISTEMA LINEAR DE ORDEM "n" PARA UM SINAL DE ENTRADA DO TIPO RAMPA

A função de transferência de um sistema linear genérica de ordem "m" pode ser escrita como:

$$G(s) = \frac{(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_m)} \quad (2.10)$$

onde " z_i " são os zeros da função e " p_j " são os polos da mesma. Lembrando que a função de transferência é definida como a transformada de Laplace do sinal de saída dividida pela transformada de Laplace do sinal de entrada, ou seja

$$G(s) = \frac{O(s)}{I(s)} \quad (2.11)$$

Para um sinal de entrada em forma de rampa do tipo $i(t)=t$, cuja transformada de Laplace é dada por $1/s^2$, a transformada de Laplace do sinal de saída é dada por

$$O(s) = G(s)I(s) = \frac{G(s)}{s^2} \quad (2.12)$$

Assumindo um sistema do tipo representado pela equação 2.10, a transformada de Laplace do sinal de saída é dada por

$$O(s) = \frac{(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_m)} \frac{1}{s^2} \quad (2.13)$$

Conforme demonstrado no ANEXO 12, no domínio do tempo o sinal de saída é da forma:

$$O(t) = K_1 e^{-p_1 t} + K_2 e^{-p_2 t} + \cdots + K_m e^{-p_m t} + K_{m+1} (t - \theta) \quad (2.14)$$

onde a única variável é t .

Como em geral os polos de um sistema real são negativos, isto é, p_i é positivo, após um certo tempo todos os termos com exponencial tendem a zero, ou seja,

$$K_i e^{(-p_i t)} \rightarrow 0 \quad (2.15)$$

e conseqüentemente, $O(t)$ tende a:

$$O(t) = K_{m+1} (t - \theta) \quad (2.16)$$

onde K_{m+1} é o ganho do sistema. Ou seja, assumindo um sinal de entrada em forma de uma rampa, o sinal de saída, após um intervalo de tempo suficientemente grande, tende a seguir o sinal de entrada com uma diferença constante e igual a θ , conforme mostrado na Figura 2.2, ou seja, $O(t) = I(t - \tau)$, onde τ é definido como tempo de atraso.

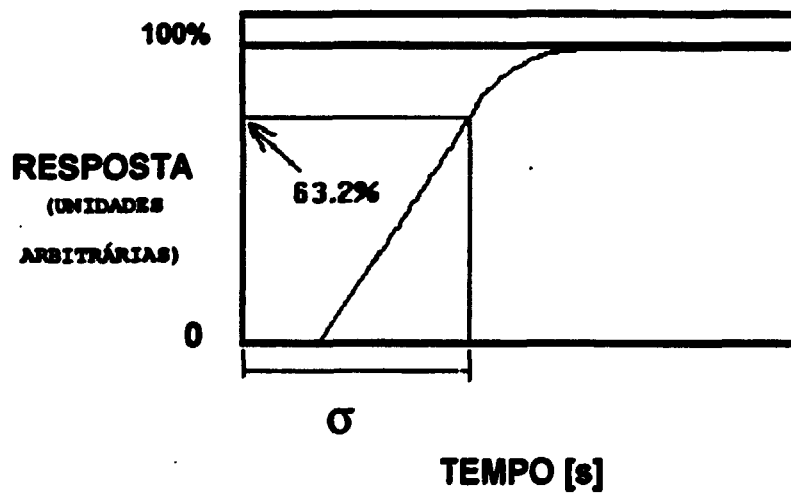


Figura 2.1. Teste em Degrau e a Determinação da Constante de Tempo

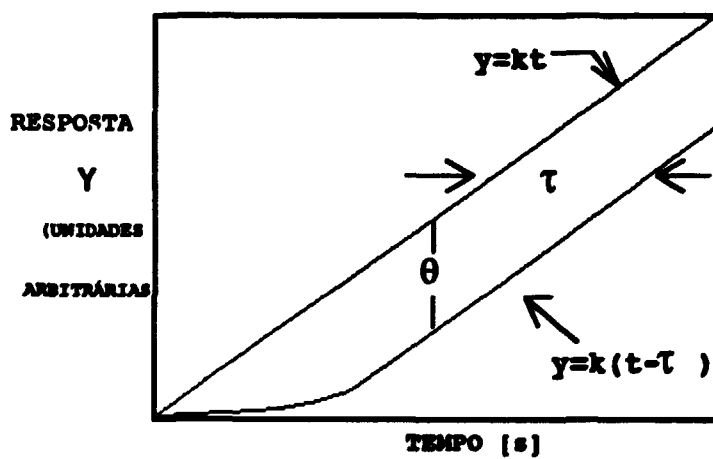


Figura 2.2. Resposta Ideal em Rampa de um Transdutor

3 TRANSDUTORES UTILIZADOS PARA MEDIDA DE PRESSÃO EM CENTRAIS NUCLEARES

Conforme citado anteriormente, um transdutor é qualquer dispositivo capaz de transformar um tipo de sinal em outro, com o objetivo de transformar uma forma de energia em outra.

Desta, forma os transdutores de pressão são largamente utilizados em instalações nucleares e convencionais para diversas finalidades.

A Tabela 3.1 mostra alguns dos principais transdutores de pressão ligados ao sistema de proteção da Central Nuclear "Almirante Álvaro Alberto" Unidade I (Angra I).

Os transdutores de pressão possuem duas tomadas de pressão: uma de baixa pressão e outra de alta pressão, através das quais se estabelece o diferencial de pressão. A tomada de baixa pressão do transdutor pode ser aberta para a atmosfera (para medidas de pressão manométrica), selada e fechada a vácuo (para medidas de pressão absoluta) ou conectada a linhas de baixa pressão para medidas de pressão diferencial.

Tabela 3.1 - Principais Transdutores de Pressão Ligados ao Sistema de Proteção de Angra I

FAIXA (MPa)	VARIÁVEL MONITORADA	#	FABRICANTE	PRESSÃO MEDIDA	TIPO DE SENSOR
11,76-17,64	Pressão no Pressurizador	4	Foxboro	ABSOLUTA	BALANÇO DE FORÇA
0-0,096	Vazão no Circuito Primário	4	Foxboro	DIFERENCIAL	BALANÇO DE FORÇA
0-8,8	Pressão de vapor	6	Foxboro	ABSOLUTA	BALANÇO DE FORÇA
0-0,1696	Vazão no Circuito Secundário	4	Foxboro	DIFERENCIAL	BALANÇO DE FORÇA
0,0544-0,0148	Nível no Gerador de Vapor	6	Foxboro	DIFERENCIAL	BALANÇO DE FORÇA
0,0584-0,0264	Nível no Pressurizador	3	Barton	DIFERENCIAL	STRAIN GAGE
0-0,1	Vazão de Vapor	4	Barton	DIFERENCIAL	STRAIN GAGE
0-0,392	Pressão no Envoltório (Contenção)	4	Barton	ABSOLUTA	STRAIN GAGE

Como medidor de pressão diferencial, os transdutores de pressão são empregados para a medida de nível em tanques e vazões. Neste caso, elementos primários (placas de orifício, tubos de Pitot, etc..) são utilizados para gerar uma diferença de pressão e a partir dela calcula-se a vazão de gases, vapores e líquidos através de tubulações.

Os transdutores de pressão utilizados em centrais nucleares e convencionais, são instrumentos eletro-mecânicos complexos formados, basicamente, por dois sistemas: um mecânico e um eletrônico.

O sistema mecânico de um transdutor é composto de um elemento sensor elástico (diafragma, fole, tubo Bourdon), que flete com a pressão. O movimento do elemento sensor é detectado e convertido pelo sistema eletrônico em um sinal elétrico mensurável.

Os transdutores de pressão podem ser classificados pela forma com que a deslocamento do elemento sensor é transformado em um sinal elétrico. Dois princípios são utilizados: o "motion-balance" e o "force-balance". No princípio de motion-balance o deslocamento do elemento sensor é proporcional à pressão aplicada, e permanece constante até que haja uma variação de pressão (o elemento sensor pode ser visto como uma mola cuja deformação é proporcional à força aplicada). Já no force-balance o deslocamento do elemento sensor é visto como um sinal de erro, que por sua vez gera uma força eletromagnética que tende a reposicionar o elemento sensor na posição original. Neste caso o sinal medido provém da "força" que está sendo

aplicada para "balancear" o sistema, e que por sua vez, deve ser igual à força causada pela pressão aplicada no elemento sensor.

No caso de transdutores que usam o princípio do "motion balance", o deslocamento do elemento sensor é transformado num sinal eletrônico através de um "strain gage", célula capacitiva, ponte de relutâncias ou "fio ressonante".

O fabricante de transdutores para aplicação em centrais nucleares que utiliza strain gage é a ITT/Barton. Há dois modelos de transdutores de pressão: o primeiro, modelo 764, é utilizado para medidas de pressão diferencial, o outro, modelo 763, é utilizado para medidas de pressão absoluta.

Como mostra a Figura 3.1, o principal componente do modelo 764 é chamado de DPU (Differential Pressure Unit), ou Unidade de Pressão Diferencial, que consiste de um dispositivo mecânico formado por um conjunto de dois foles conectados internamente através de um eixo e envolvidos por duas câmaras de pressão, uma barra sensora na qual está conectado um strain gage, um disco central, válvulas de sobre-pressão, um compensador de temperatura e um conjunto para ajuste de faixa de pressão. O volume interno dos foles é preenchido com fluido não corrosivo.

Durante a operação, os dois foles deslocam-se linearmente na medida em que a pressão é aplicada, e este deslocamento é transmitido ao "strain gage" através da barra sensora. Este efeito altera a resistência que balanceia a ponte, e gera um sinal de saída que é transformado em um sinal de corrente DC.

A Figura 3.2 apresenta um transdutor da ITT/Barton, que utiliza o princípio descrito no item anterior.

A célula capacitiva, como mostra a Figura 3.3, consiste de um diafragma interno, óleo que serve para preencher o interior da célula e dois diafragmas externos que estão sob a influência de duas pressões diferentes e isolam a célula do fluido da linha de pressão. O diafragma interno é o elemento sensor e tem em sua região central um disco metálico que combinado com duas placas capacitivas montadas na parte interna do transdutor formam um sistema capacitivo (um sistema de duas placas capacitivas paralelas conectadas em série).

Uma alteração na pressão em qualquer um dos lados da célula é transmitida da linha de processo até o diafragma sensor através dos diafragmas de isolamento e do óleo que preenche o interior da célula. Isto faz com que o diafragma interno se deforme e desloque a placa capacitiva do seu ponto de equilíbrio, movendo-se em direção a uma das placas capacitivas e afastando-se da outra.

Uma vez que a capacitância de cada capacitor é proporcional à distância entre as placas, o resultado final é que um dos capacitores tem a sua capacitância aumentada enquanto a outra tem a sua capacitância diminuída. A diferença entre as capacitâncias, que assume-se seja proporcional à diferença de pressão que está sendo aplicada ao transdutor, é convertida em um sinal de corrente contínua (DC).

A Figura 3.4 mostra um diagrama esquemático de um transdutor de ponte de relutâncias.

Como mostra a Figura 3.4, um diafragma (DIAPHRAGM) de aço inox, magneticamente permeável, é fixado entre dois blocos também de aço inox. No interior dos blocos existe uma bobina de indutância (COIL L_1 e L_2), e o núcleo destas bobinas, na forma de "E", são envolvidas por um disco de inonel para prevenir corrosão. O diafragma, quando livre da ação de qualquer força, está centrado com igual distanciamento (GAP_1 e GAP_2), com cerca de 0.005 polegadas ou $127E-06$ metros entre cada uma das bobinas, o que resulta em igual valor de relutância para cada bobina.

Quando um diferencial de pressão atua sobre as tomadas de pressão do sensor (PRESSURE PORT), o diafragma flete em direção à uma das bobinas, se afastando da outra, o que resulta numa diminuição da distância do diafragma em relação a uma das bobinas e aumento em relação a outra. Como a relutância magnética varia com a distância relativa entre o diafragma e as bobinas, o que determina o valor da indutância de cada uma das bobinas, o diferencial de pressão acaba por desbalancear a ponte de relutância, aumentando a relutância de uma bobina e diminuindo a da outra.

A Figura 3.5 mostra o transdutor conectado à uma ponte AC, que aproveita as vantagens da variação de indutância nas bobinas do transdutor. Estas bobinas formam uma "meia-ponte", e um transformador no portador/demodulador para alimentação do circuito (T_1) forma a outra metade.

O sinal elétrico de saída da ponte é um sinal AC, cuja fase depende da direção de deslocamento do diafragma, e quando

o diafragma está na sua posição de repouso, o sinal de saída da ponte é mínimo. Como a relação deslocamento do diafragma-pressão diferencial aplicada é linear, o sinal de saída da ponte é linear com a pressão. Se o diafragma for deslocado em sentido contrário, a relação de fase entre a tensão de excitação e o sinal de saída da ponte se revertem de 180° , identificando se houve um aumento ou diminuição da pressão aplicada. A função do módulo portador/demodulador é a de amplificar, demodular (retificar) e filtrar o sinal AC em um sinal de tensão \pm DC, que representa a magnitude e "polaridade" da pressão aplicada. Um indicador digital é utilizado para ajustar, demodular e amplificar o sinal de saída do transdutor à faixa de pressão a ser aplicada. Este ajuste é feito através de dois potenciômetros: um potenciômetro para ajuste de "zero" e outro para ajuste "span", os quais fornecem como sinal de saída uma tensão de 0 a 10 VDC, proporcional à pressão aplicada ao sensor de referência.

O seu mostrador de 3 1/2 dígitos indica a pressão aplicada em termos percentuais, ou seja 0% para início de escala e 100% para o fundo de escala.

Conforme mencionado antes, nos transdutores que usam o princípio do "force-balance" uma força é gerada para balancear a força resultante da pressão aplicada ao elemento sensor.

A Figura 3.6 mostra o esquema simplificado de um sensor de pressão diferencial do tipo "force-balance" (balanço de forças) e a Figura 3.7 mostra um transdutor da marca Foxboro Company.

Na Figura 3.6 o elemento sensor é o diafragma D, que é submetido a duas pressões diferentes, uma alta (H) e uma baixa (L). O produto entre a diferença de pressão e a área efetiva do diafragma gera uma força que se propaga através do sistema mecânico para mover um braço de alavanca e um disco de ferrite. O disco de ferrite faz parte de um transformador diferencial, e seu deslocamento gera um sinal de erro que realimenta o circuito eletrônico do sensor, causando uma variação na corrente DC que passa pelo circuito. A corrente DC, que também representa o sinal de saída do instrumento, passa por uma bobina colocada perpendicularmente a um campo magnético, gerando uma força magnética proporcional à corrente. A variação na corrente gera uma variação na força magnética, que é a força de reação, e uma vez que o instrumento seja o apropriado para o intervalo de medida, a força de reação tende a cancelar a força gerada pela diferença de pressão (daí o nome de balanço de forças).

Devemos ressaltar que além da dinâmica da parte mecânica do transdutor, outros fatores podem afetar o tempo de resposta do mesmo quando instalado no processo.

A Figura 3.8 mostra um "pote de selagem", utilizado para isolar fisicamente o fluido de processo do circuito primário do transdutor, onde a tubulação vista é o capilar que interliga o pote ao transdutor. Este isolamento se torna necessário para impedir que haja contaminação radioativa do instrumento. O pote é formado internamente por um diafragma e por um fole, que

transmitem o sinal proveniente do processo e que podem aumentar significativamente o tempo de resposta do transdutor.

Outro fator que pode afetar o tempo de resposta do instrumento é o sistema eletrônico, que é responsável pela conversão do sinal de pressão em um sinal elétrico, proporcional à pressão aplicada ao instrumento. Através deste sistema é possível ajustar a calibração do instrumento, efetuar a elevação do "zero", ajustar a linearidade, e em alguns casos ajustar o "damping" (amortecimento), recurso utilizado para diminuir o ruído do sinal de saída do transdutor. O tempo de resposta do transdutor é portanto, dependente do ajuste de "damping". O tempo de resposta típico para este tipo de instrumento varia, geralmente, de 0.2 segundos a 2.0 segundos.

Nestes transdutores, o sinal de saída é transmitido pelos mesmos fios que fornecem a alimentação para o seu funcionamento, ou seja, são transdutores a dois fios, e dependendo da opção utilizada, fornecem um sinal de saída em forma de corrente DC que varia de 4mA a 20 mA, ou de 10mA a 50mA.

Em relação aos transdutores analisados, não podemos esquecer que um dos efeitos que afetam o tempo de resposta é denominado "atraso hidráulico", e depende principalmente do volume de fluido que deve ser deslocado na linha de pressão para levar a informação de mudança de pressão no processo até o transdutor. Este volume é função direta do projeto do transdutor, pois o movimento do elemento sensor requer igual

movimento de volume do fluido na linha de pressão. Outro fator é denominado de "atraso acústico" (4.2) e depende do comprimento da linha de pressão, e quanto maior for a mesma, maior será o tempo necessário para que o fluido percorra aquela distância, além de ter que vencer a sua própria resistência. O parâmetro denominado "Transmitter Compliance" é utilizado para reunir estes dois efeitos. Este parâmetro relaciona a variação de volume necessária para causar uma variação de pressão, ou seja:

$$\text{COMPLIANCE} = \frac{\text{MUDANÇA NO VOLUME DO TRANSDUTOR}}{\text{MUDANÇA NA PRESSÃO DE PROCESSO}} = \frac{\text{m}^3}{\text{kgf/cm}^2}$$

Desta forma, transdutores com grande volume interno requerem um volume maior de movimentação de fluido para indicar a respectiva variação de pressão. Nestes casos o tempo de resposta do transdutor somado ao tempo de resposta devido à linha de pressão é fortemente influenciado pelo o diâmetro da linha, pelo seu comprimento e por qualquer obstrução ou gás existente na linha.

Devido à importância deste parâmetro, conforme o exposto nos itens anteriores, recomenda-se aos fabricantes de transdutores de classe nuclear que o mesmo venha especificado de fábrica, pois servirá como um requisito adicional a ser considerado na hora da escolha do instrumento.

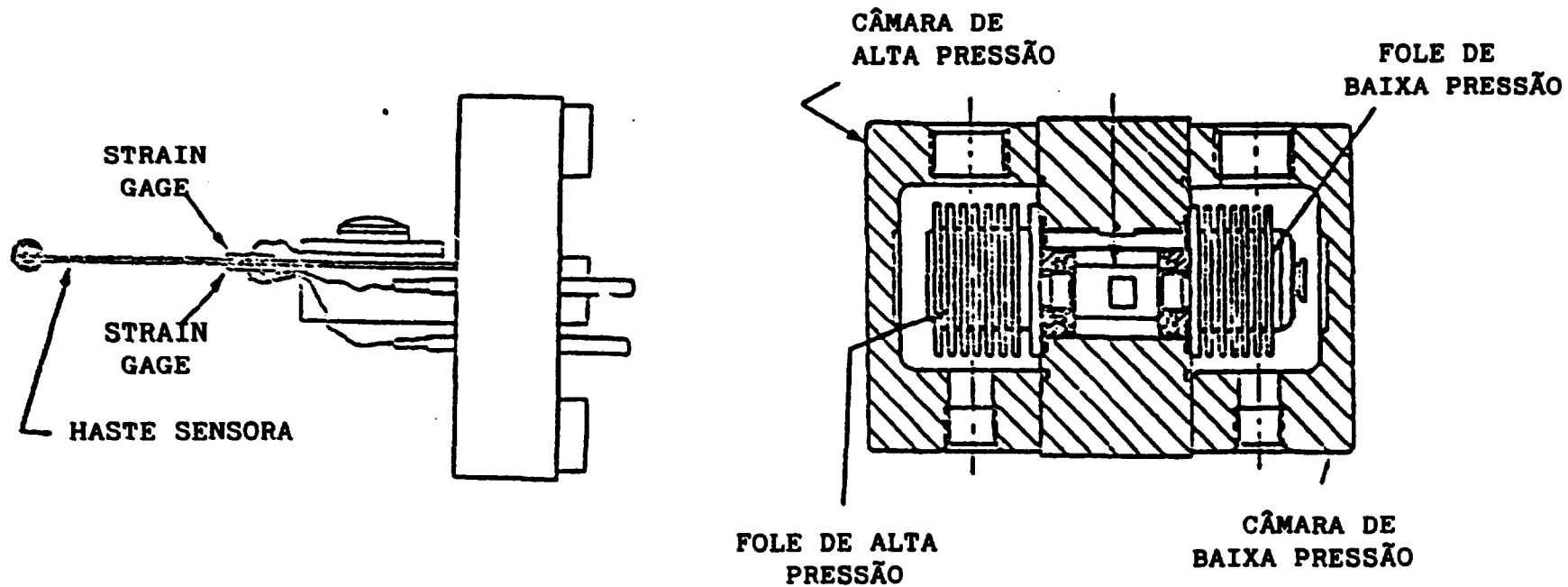
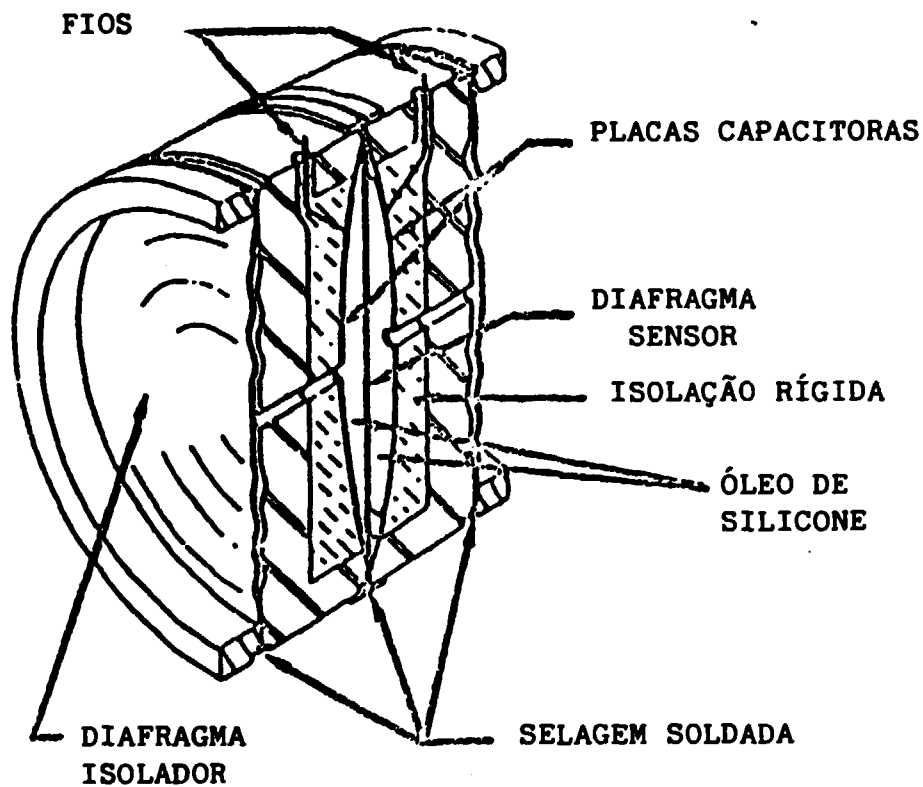


Figura 3.1. Differential Pressure Unit Utilizada no ITT/Barton Modelo 764



Figura 3.2. Transdutor da ITT/Barton



**Figura 3.3. Esquema Simplificado de um transdutor de Pressão
com Célula Capacitiva**

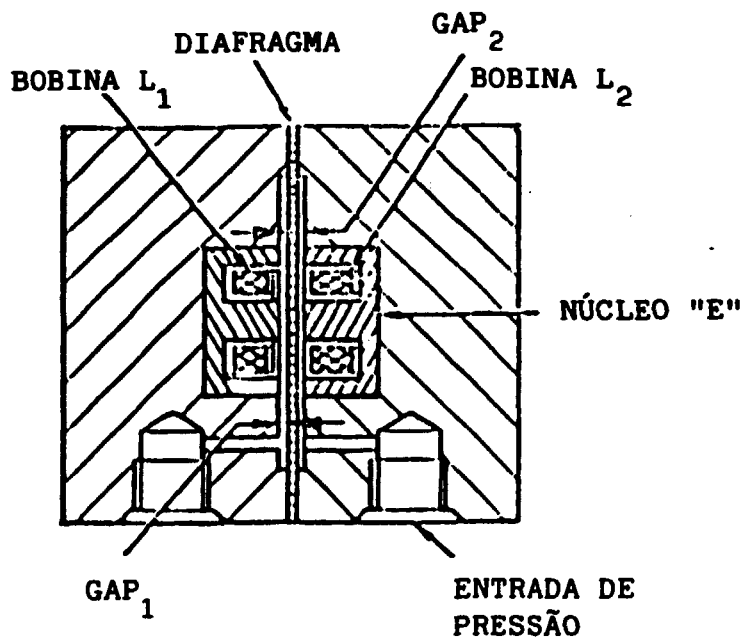


Figura 3.4. Diagrama Esquemático de um Transdutor de Relutância

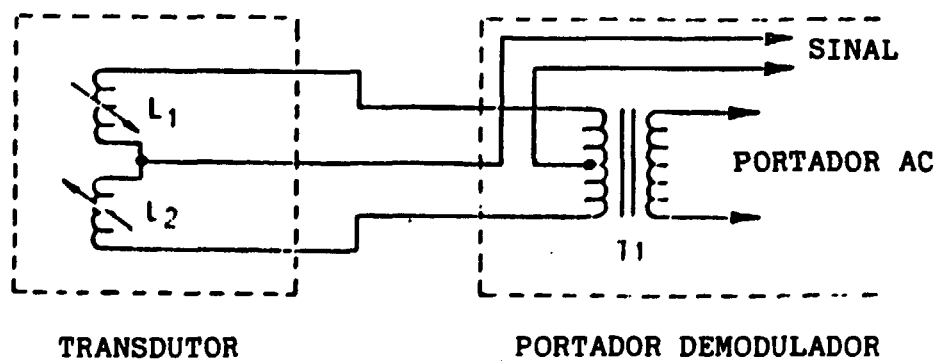


Figura 3.5. Circuito em Ponte de um Transdutor de Relutância

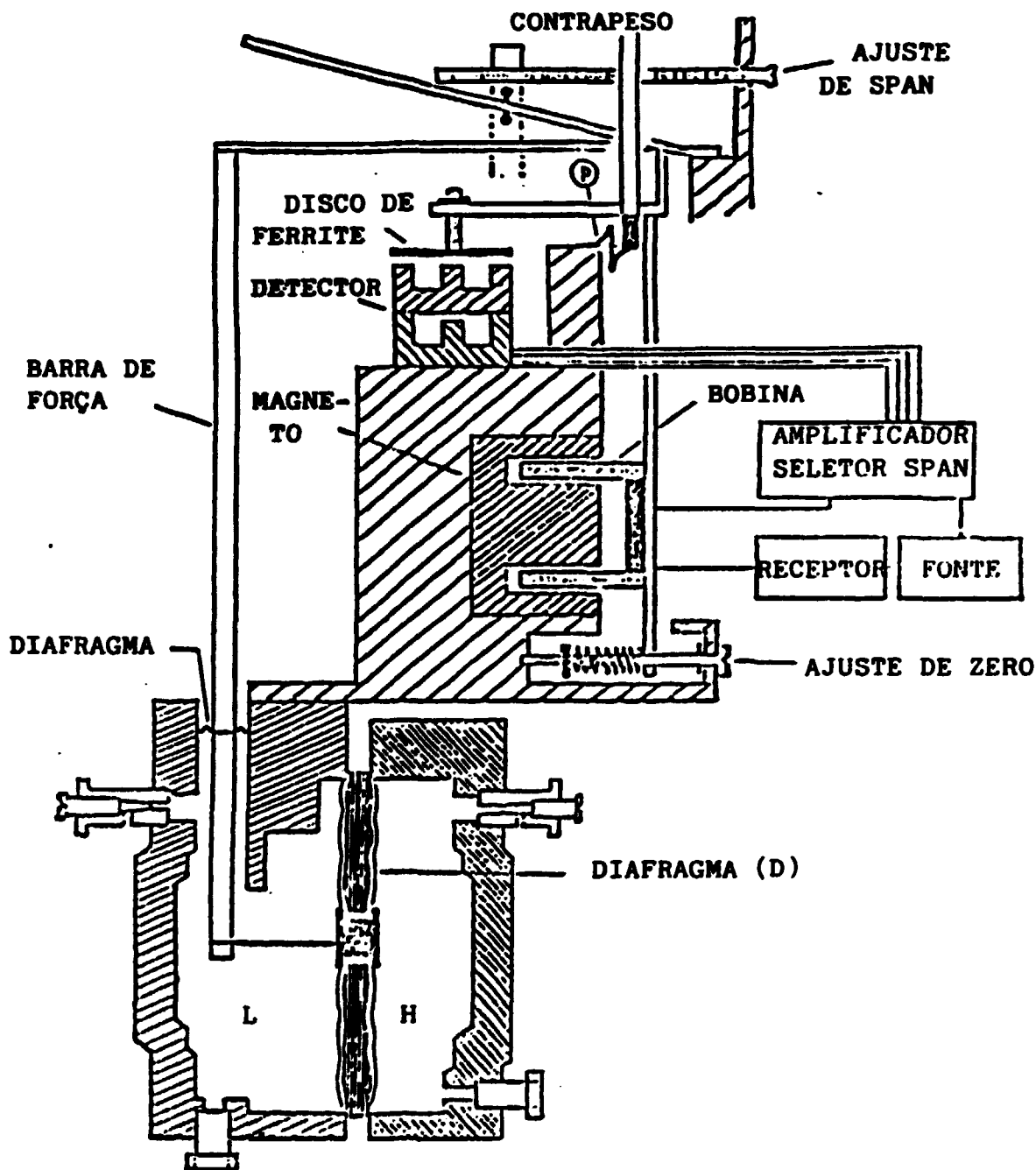


Figura 3.6. Esquema Simplificado de um Transdutor de Pressão do Tipo Balanço de Forças

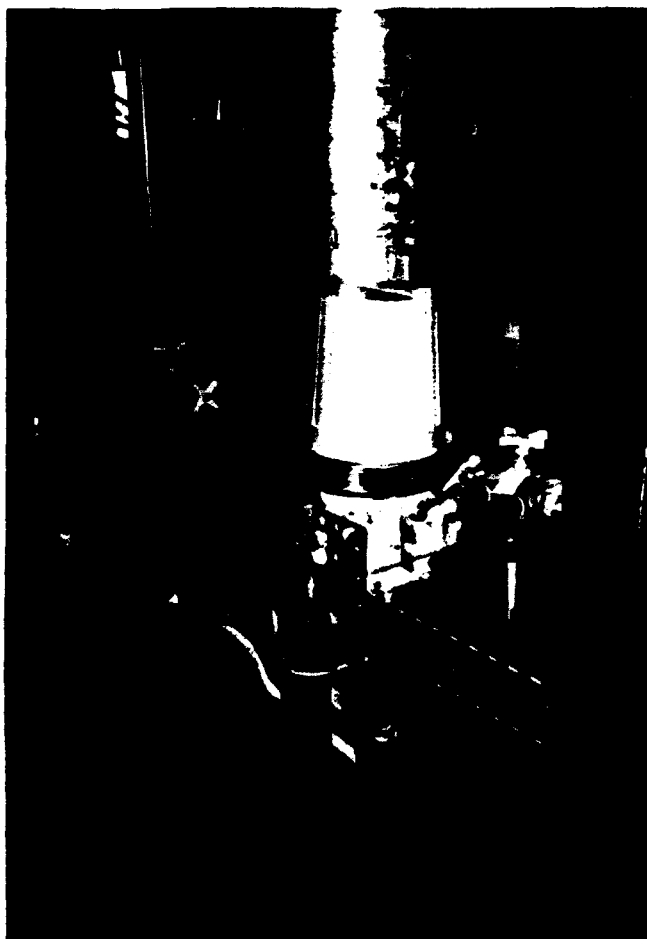


Figura 3.7. Transdutor da Foxboro



Figura 3.8 POTE DE SELAGEM

4 CAUSAS E MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA

4.1 - DEGRADAÇÃO DOS SENSORES

Os transdutores de pressão utilizados em centrais nucleares estão expostos a condições que podem degradar o seu desempenho dinâmico com o tempo, a saber: temperatura, umidade, pressão e fluência. Além das condições ambientais, outros fatores podem contribuir para a degradação do transdutor, como veremos a seguir.

4.1.1 - TEMPERATURA E UMIDADE

Como concluiu Hashemian (2), há diversos fatores que podem influenciar de maneira negativa o desempenho dinâmico de um transdutor de pressão. Através de ensaios em laboratório, onde foram testados diversos transdutores, inclusive alguns utilizados em instalações nucleares, ele mostrou que a causa de degradação mais importante é o envelhecimento térmico dos componentes eletrônicos dos transdutores, que pode afetar o

tempo de resposta em até 25%. Efeitos nocivos de umidade também tornam-se mais danosos na medida em que se aumenta a temperatura, pois as taxas de difusão são então elevadas. Em geral a parte da eletrônica do transdutor é a mais afetada pela umidade que pode penetrar no transdutor pois a selagem pode não ser perfeitamente hermética após longo tempo de exposição à temperatura que circunda o transdutor. Um efeito significativo da presença de umidade no transdutor pode ser um curto-circuito na eletrônica, ou a corrosão de partes metálicas.

Os componentes eletrônicos dos transdutores de pressão incluem numerosos resistores, capacitores, circuitos integrados e outros, que são responsáveis pela conversão, condicionamento e linearização do sinal de saída do transdutor. Quase todos estes componentes estão sujeitos a alterações quando sujeitos a longos períodos de exposição à temperatura e umidade.

Os efeitos de temperatura são também importantes em medidas de variáveis tais como a pressão na contenção, onde cuidados especiais devem ser tomados para evitar que variações de temperatura na tomada de referência influenciem no valor da medida.

4.1.2 - PRESSÃO

Os transdutores de pressão são continuamente submetidos a pequenas flutuações de pressão durante a operação normal, e

grandes variações de pressão durante "trips"* ou outros eventos. O fenômeno conhecido como Golpe de Ariete, por exemplo, representa um forte gradiente de pressão e pode facilmente degradar o desempenho do transdutor.

A fadiga a que um transdutor de pressão é submetido, e que em geral é resultante da pressão aplicada, pode causar degradação no seu desempenho. De uma forma geral, as falhas são facilmente detectadas, pois afetam a calibração dos instrumentos. A seguir são listadas algumas falhas típicas com consequente perda de calibração.

- Deformação permanente do elemento sensor, ou vazamento devido a transientes durante trips do reator ou durante a manutenção;

- Falhas mecânicas devido a rupturas e vazamentos, que podem causar indicações falsas ou incoerentes;

- Falha do diafragma devido a sobrecarga, que pode causar rachadura ou fadiga e mudança de sua rigidez;

- Falha de selagem, permitindo que a umidade se infiltre no transdutor;

- Perda de componentes mecânicos em transdutores que utilizam o sistema de balanço de forças, devido a flutuações fortes de pressão, ou vibrações mecânicas;

- Degradação ou vazamento do fluido (geralmente óleo) que envolve o sensor. Se esta degradação envolver mudanças nas propriedades do fluido, podem ocorrer alterações no tempo de

* "trip" é o desligamento do reator por questões de segurança. Este tipo de desligamento pode ser acionado manualmente ou automaticamente.

resposta. Qualquer vazamento do fluido pode também ocasionar modificações na calibração do transmissor, como verificado no período entre 1986 e 1987, quando cinco transmissores da marca ROSEMOUNT modelos 1153 & 1154, apresentaram vazamento . Tal vazamento ocasionou desvios de leitura em relação aos seus pares redundantes instalados nos respectivos canais. Estes desvios foram percebidos com a planta em funcionamento (8).

4.1.3 - FLUÊNCIA NEUTRÔNICA (EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO)

Em geral, o desempenho dinâmico dos transdutores de pressão de uma central nuclear é pouco afetado pela radiação nuclear. As razões são duas. Em primeiro, devido aos cuidados adotados na construção do instrumento, procurando utilizar materiais que não sejam alterados pela radiação (baixa seção de choque de absorção) e em segundo porque os transdutores são instalados em locais protegidos, onde o nível de radiação é mínimo. Dessa forma minimiza-se a interação da radiação com o transdutor e sua influência na dinâmica do instrumento (1,2).

4.1.4 - MANUTENÇÃO

A manutenção é uma das causas que podem causar danos ao transdutor e degradar o seu tempo de resposta. Estas manutenções são feitas, geralmente, nas etapas de carregamento do núcleo, quando então são feitas diversas verificações, tais como tempo de resposta e calibração. No último caso, quando é verificado algum desvio na calibração, faz-se necessário o devido ajuste, que é feito através de potenciômetros. Esta operação pode causar falha ou quebra do componente, que não necessariamente é notado antes do ligamento da instalação.

Outro exemplo de problema induzido por manutenção, ocorre quando as pressões aplicadas durante os testes do transdutor são aplicados imprópriamente, ou quando as válvulas de isolamento e equalização não são manipuladas corretamente para prevenir exposição do transdutor a variações bruscas de pressão.

Outras degradações induzidas podem ocorrer durante a calibração e manutenção dos transdutores, quando estes são pressurizados e submetidos a ciclos que estão acima da sua faixa normal de trabalho. Neste último caso, que chamamos de sobre-pressão, Hashemian observou que a degradação do tempo de resposta pode chegar a 22% .

A Tabela 4.1 mostra um resumo dos principais tipos de degradação em transdutores de pressão, e que causam alterações nas características dinâmicas dos mesmos.

Tabela 4.1. Efeitos que Podem Causar Degradação no Tempo de Resposta de Transdutores de Pressão

DEGRADAÇÃO	CAUSA	EFEITOS
Deformação do diafragma	Flutuações de pressão Vibrações mecânicas	Alterações sobre a espessura do elemento sensor causando alterações na sua resposta dinâmica
Desgaste e fricção de junções mecânicas	Flutuações de pressão Corrosão e oxidação	Alterações na capacidade de restauração do sistema causando a perda de confiabilidade na resposta do instrumento
Perda parcial ou total de fluido	Falha de fabricação ou manuseio impróprio	Perda de linearidade do sinal de saída Alterações significantes de capacitância
Degradação do fluido	Alterações químicas do óleo devido à radiação/calor	Alterações de viscosidade, alterando a resposta dinâmica do instrumento

Tabela 4.1. Efeitos que Podem Causar Degradação no Tempo de Resposta de Transdutores de Pressão (CONTINUAÇÃO)

DEGRADAÇÃO	CAUSA	EFEITOS
Infiltração do fluido de processo para a célula sensora	Quebra do diafragma	Alterações de capacitância, causando perda de linearidade
Alterações nos valores dos componentes eletrônicos	Calor, radiação, umidade, flutuações de tensão e manutenção	Alterações na resposta dinâmica e linearidade da eletrônica
Alteração de Set-Point*	Alteração de calibração	Aumento do tempo para alcançar o Set-point, com aumento do tempo de resposta
Falha de selagem	Fragilização e quebra	Vapor no sistema eletrônico, com risco de inutilização do instrumento

* "Set-Point" é um valor determinado pelas condições de operação, que ao ser alcançado, aciona sistemas de proteção e/ou alarmes que exigem tomadas de providências por parte do pessoal de operação.

4.2 - DEGRADAÇÃO DAS LINHAS DE PRESSÃO

Outro fator que afeta o tempo de resposta de um transdutor de pressão é a possível deterioração das tubulações (linhas) que ligam o sensor ao processo, como descrito a seguir.

As linhas dos instrumentos ou linhas de pressão são utilizadas para conectar os transdutores ao processo, uma vez que estes transdutores estão geralmente localizados em pontos distantes do processo (para minimizar os efeitos de temperatura e radiação, e também para facilitar o acesso aos mesmos).

As linhas de instrumentação são fabricadas em aço inox, com diâmetros de 3/8 de polegada até 1/2 polegada. Estes tubos são projetados de maneira a evitar deformações por expansão térmica e vibração.

Dependendo da disposição física da instalação, estas linhas podem alcançar centenas de metros de comprimento, embora este comprimento deva ser o menor possível para minimizar seus efeitos sobre o tempo de resposta (9).

O efeito do comprimento de uma linha de pressão (preenchida com água) sobre o tempo de resposta do transdutor é devido ao "atraso sônico" ou "atraso acústico", descrito a seguir (10).

O atraso sônico, corresponde ao tempo necessário para que o sinal de pressão atravesse todo o comprimento da linha desde o processo até o transdutor. Como a velocidade do som na água é de, aproximadamente, 1460 metros por segundo, para uma

linha de 30 metros de comprimento, por exemplo, o atraso devido à esta componente é de 21 milisegundos.

A Figura 4.1 mostra um esquema típico de conexão do transdutor ao processo, juntamente com as válvulas de isolação e equalização.

As linhas de pressão são menos suscetíveis à degradação do que os transdutores. Entretanto, há situações que podem levar ao aumento do tempo de resposta, resultante de problemas nestas linhas, tais como:

bloqueios devidos a partículas sólidas (resíduos de solda, etc.), boro solidificado, etc;

ar ou gás dentro da linha;

instalação imprópria ou defeito nas válvulas de equalização e bloqueio;

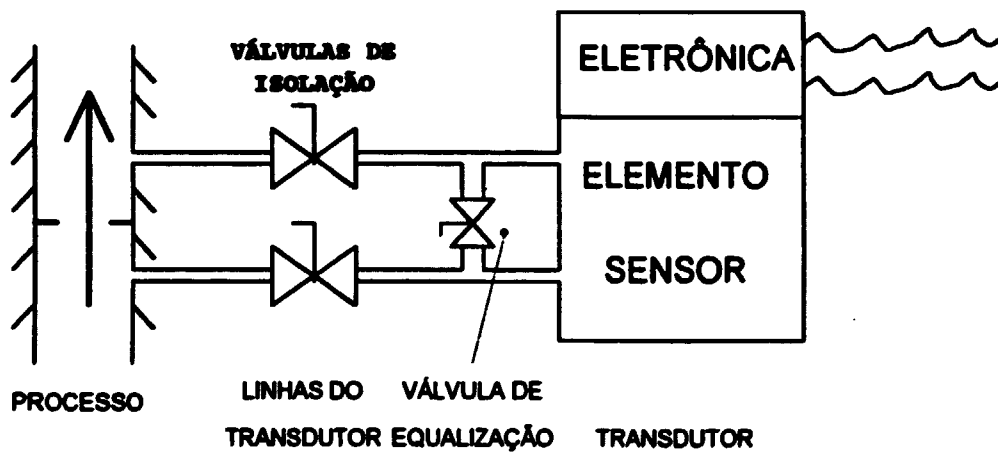


Figura 4.1. Esquema Típico de Conexão do Transdutor ao Processo

5 TRANSIENTES EM CENTRAIS NUCLEARES

Na fase de projeto de uma instalação nuclear são feitas simulações através de modelos matemáticos, que utilizam as características de projeto da instalação como parâmetros de entrada, e cujos resultados servirão para "prever" o comportamento dinâmico da instalação quando submetida a dois tipos de transientes: transientes normais de operação e transientes que são considerados como sendo anormais.

Os transientes normais de operação são aqueles causados em condições frequentes de operação, tais como partidas e desligamentos de bombas, alterações no nível de potência gerada pelo reator, aumento e diminuição da pressão de operação, alterações no nível do gerador de vapor e do pressurizador, e outros.

Por situações anormais de operação deve-se entender, na verdade, como sendo acidentes "fictícios" postulados pelos órgãos licenciadores para testar a capacidade da instalação de reagir (através dos seus múltiplos sistemas de segurança) de maneira segura, para controlar e reverter a situação de acidente.

Entre as situações de operação consideradas como acidentes estão, por exemplo:

retirada acidental das barras de controle, causando um aumento da potência do reator, que dependendo da taxa de retirada, leva ao desligamento por: temperatura, potência ou nível alto no pressurizador;

abertura acidental da válvula de segurança do pressurizador, causando o desligamento do reator por: temperatura ou pressão baixa no pressurizador;

ruptura na tubulação do circuito primário do reator, ou de qualquer outra linha conectada ao sistema. Este é considerado como o acidente mais grave em uma instalação nuclear, e as consequências decorrentes deste acidente dependem da magnitude da ruptura e da eficácia dos sistemas de proteção.

Estes acidentes são aproximados por transientes do tipo rampa podendo estas rampas serem "fortes" ou "suaves", positivas e negativas. Baseado nestas informações, pode-se estabelecer uma "sequência de eventos" no tempo para cada acidente postulado.

A Tabela 5.1 mostra, como exemplo, a sequência de eventos para um acidente de grande ruptura da tubulação do circuito primário da Usina de Angra I (11).

As Figuras 5.1 e 5.2 (11) mostram um transiente no pressurizador da Usina de Angra I, causado por uma retirada acidental das barras de controle do núcleo do reator, para diferentes taxas de inserção de reatividade.

Tabela 5.1. Sequência de Eventos Para um Acidente por Grande Ruptura do Circuito Primário

SEQUÊNCIA DE EVENTOS (TEMPOS EM SEGUNDOS)			
EVENTO	$C_D^* = 0.4$	$C_D = 0.6$	$C_D = 1.0$
INÍCIO DO ACIDENTE	0.00	0.00	0.00
DESLIGAMENTO DO REATOR POR BAIXA PRESSÃO NO PRESSURIZADOR	0.37	0.36	0.355
INÍCIO DA INJEÇÃO DO ACUMULADOR DE EMERGÊNCIA	0.64	0.53	0.44
REMOLHAMENTO DA PARTE INFERIOR DO NÚCLEO DO REATOR)	31.89	29.09	27.54
ACUMULADORES VAZIOS	43.25	40.46	38.66
INÍCIO DA REFRIGERAÇÃO FORÇADA DE EMERGÊNCIA	25.64	25.53	25.44

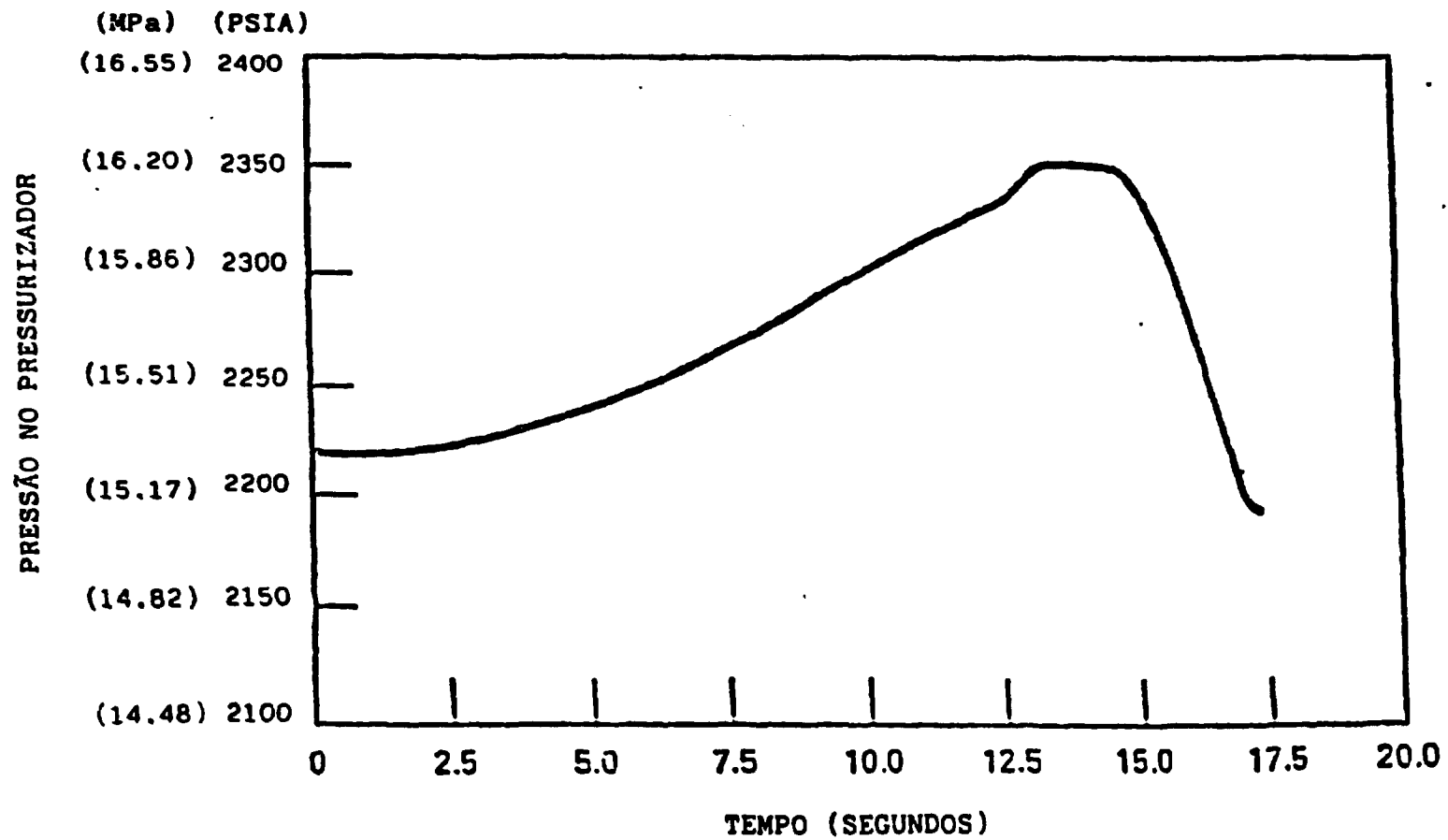
* O Coeficiente de descarga (" C_D ") é definido como a razão entre a vazão teórica e a real

Em geral, os transientes envolvidos nos transdutores de pressão podem ser aproximados por rampas, como ilustrado a seguir.

A Figura 5.3 (11) mostra um transiente gerado pela despressurização acidental do pressurizador. Este tipo de acidente pode ser causado, por exemplo, pela abertura da válvula de segurança.

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 (11) mostram, respectivamente, transientes de projeto para a câmara de contenção, assumindo uma ruptura na tubulação do circuito primário de um reator, com coeficientes de descarga de 0.4, 0.6 e 1.0.

Finalmente a Figura 5.7 (11) mostra um transiente no sistema de refrigeração do reator com os dois loops em funcionamento, quando ocorre o bloqueio do rotor de uma das duas bombas principais.



**Figura 5.1. Transiente no Pressurizador Devido a Retirada Acidental das barras de controle
(10 PCM/s)**

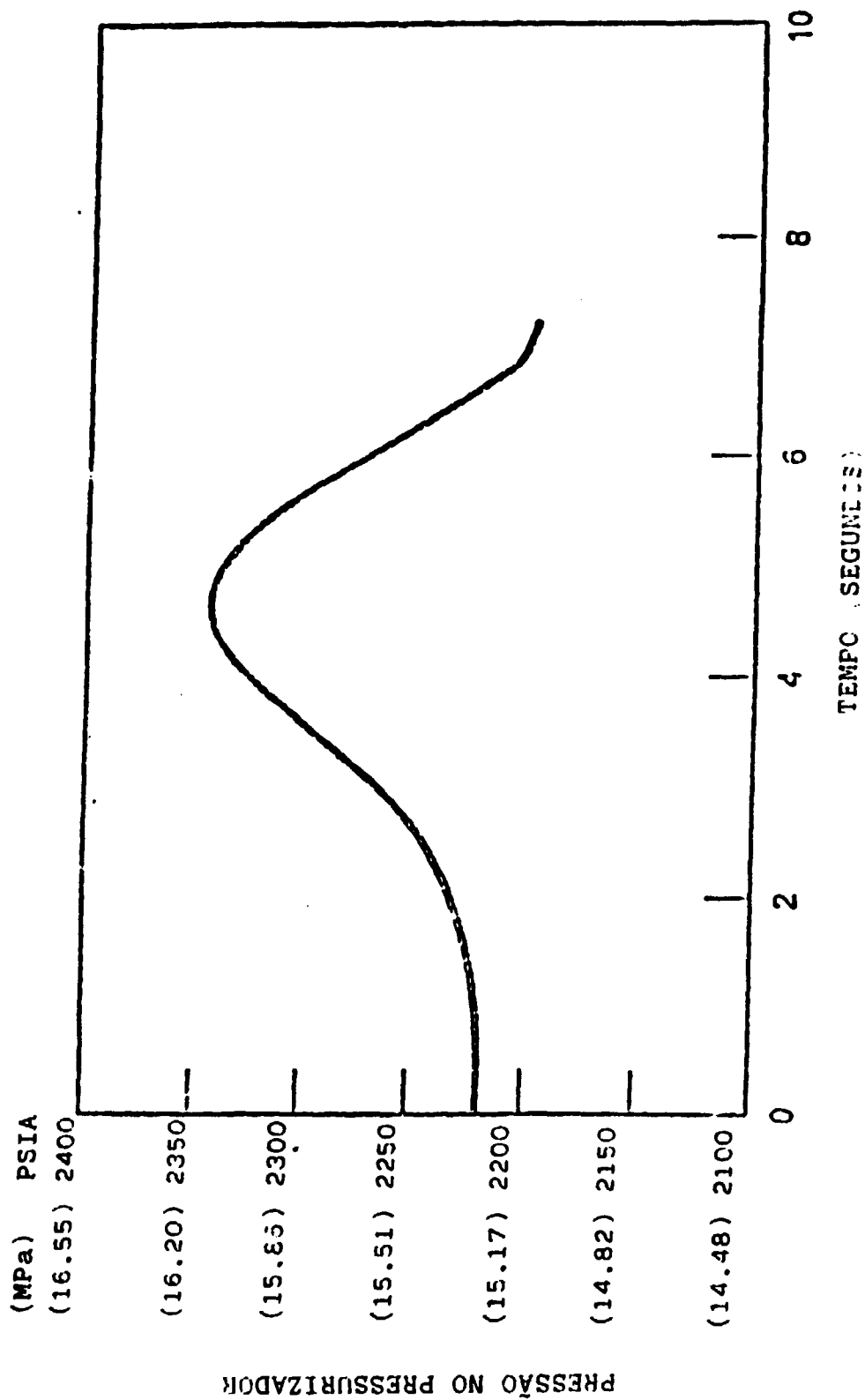


Figura 5.2. transiente no Pressurizador Devido a Retirada Acidental das barras de controle (65 PCM/s)

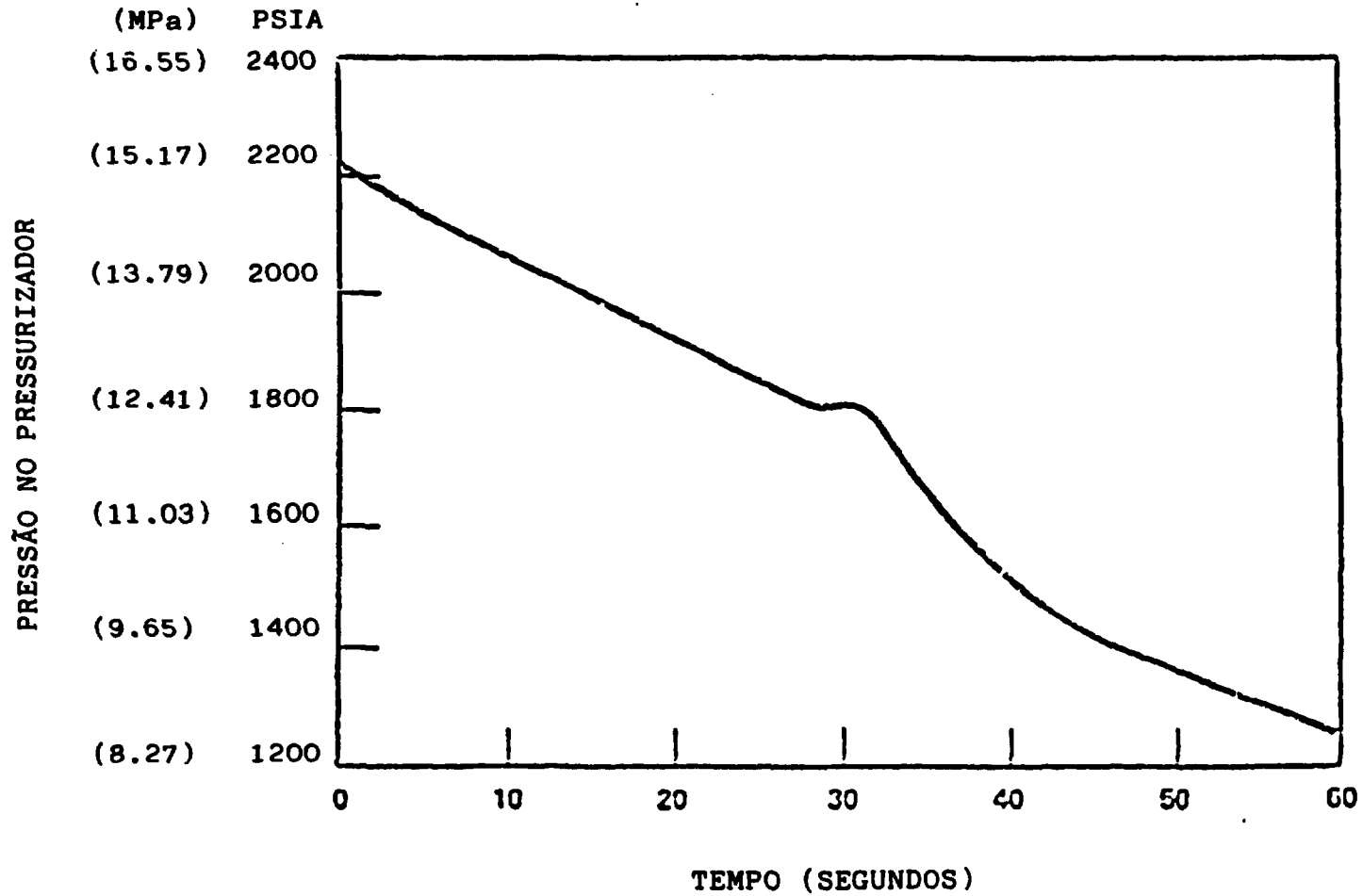


Figura 5.3. Transiente Gerado Pela Despressurização Acidental do Pressurizador

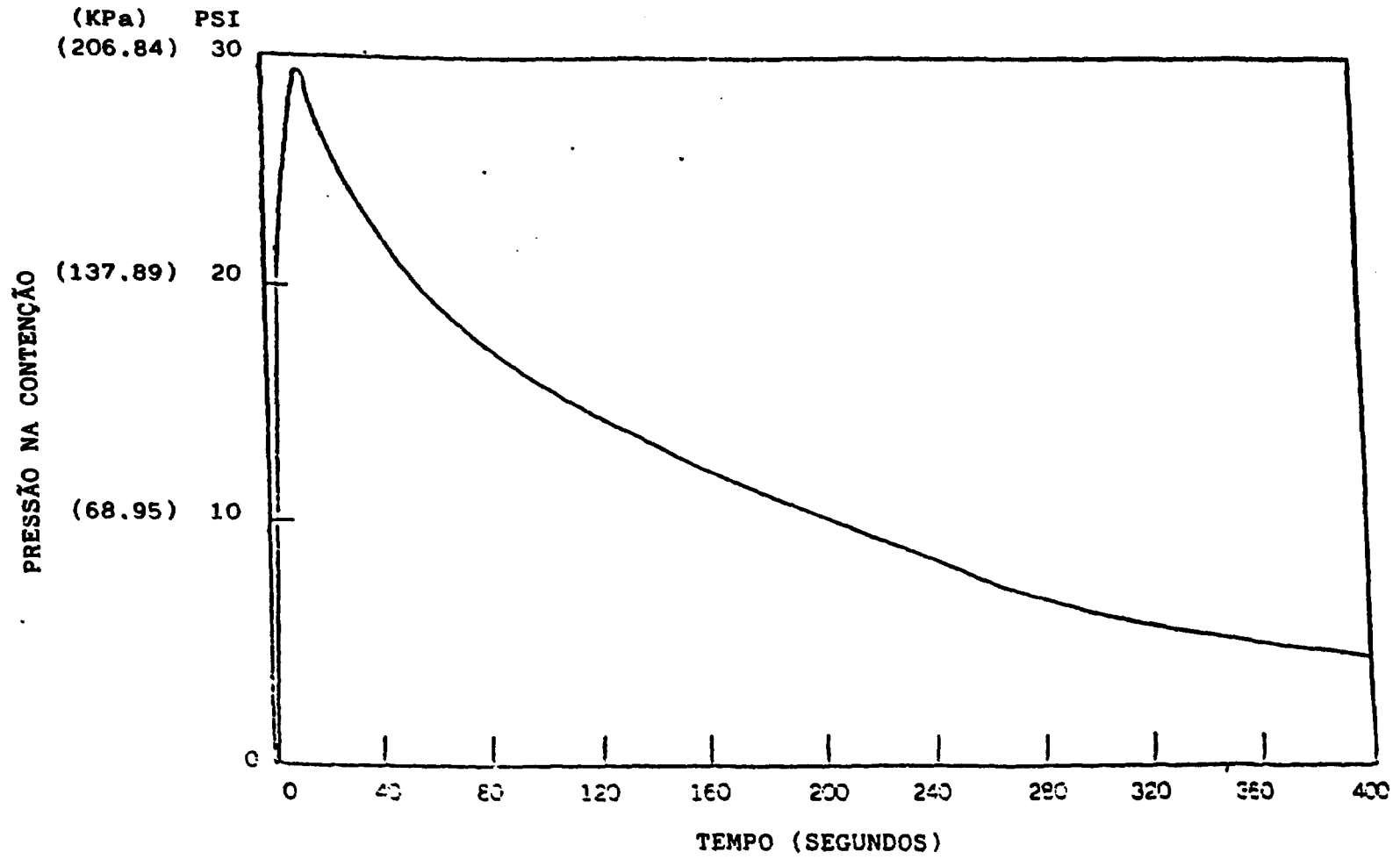


Figura 5.4. Transiente na Câmara de Contenção (CD=0.4)

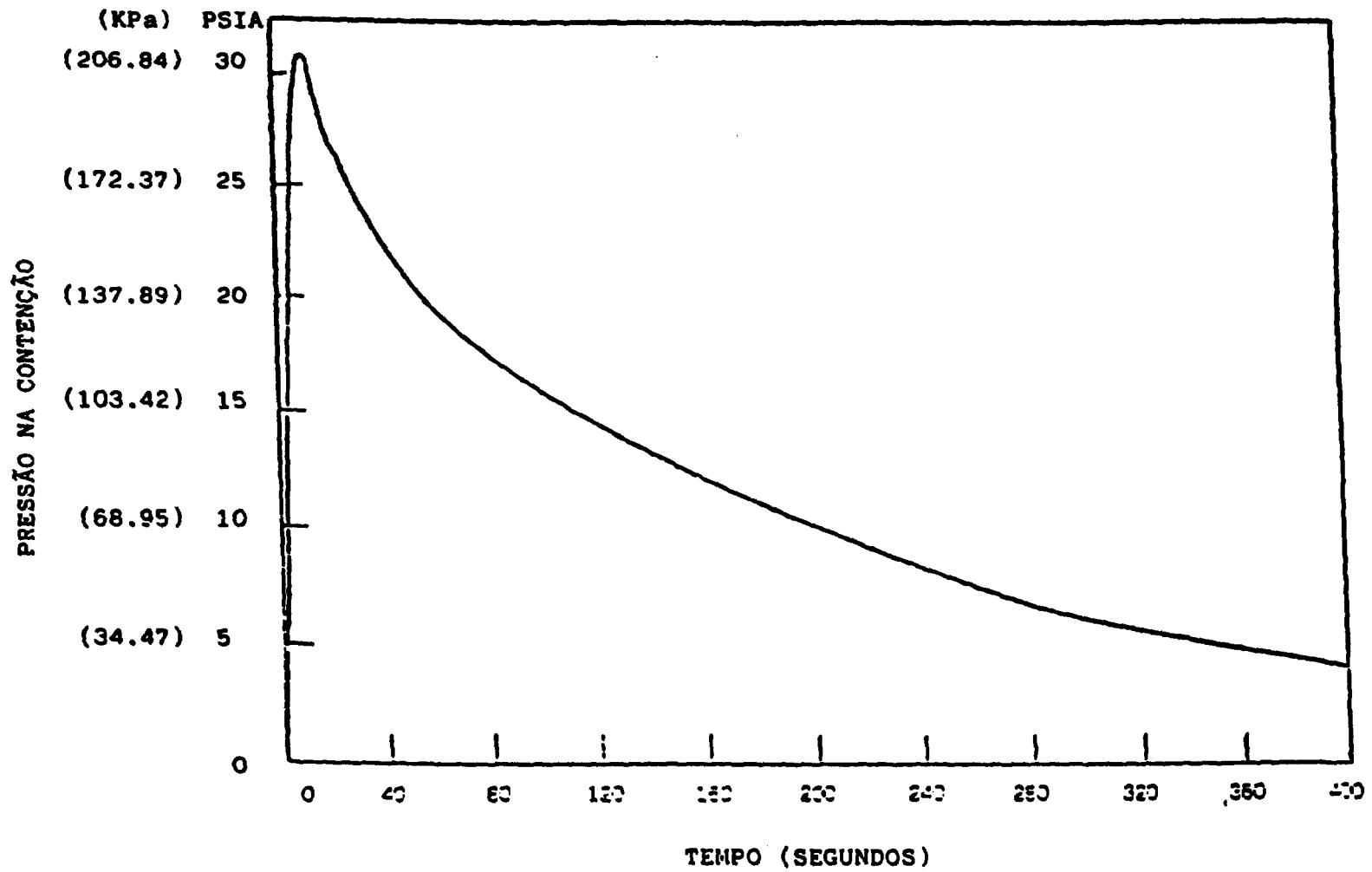


Figura 5.5. Transiente na Câmara de Contenção (CD=0.6)

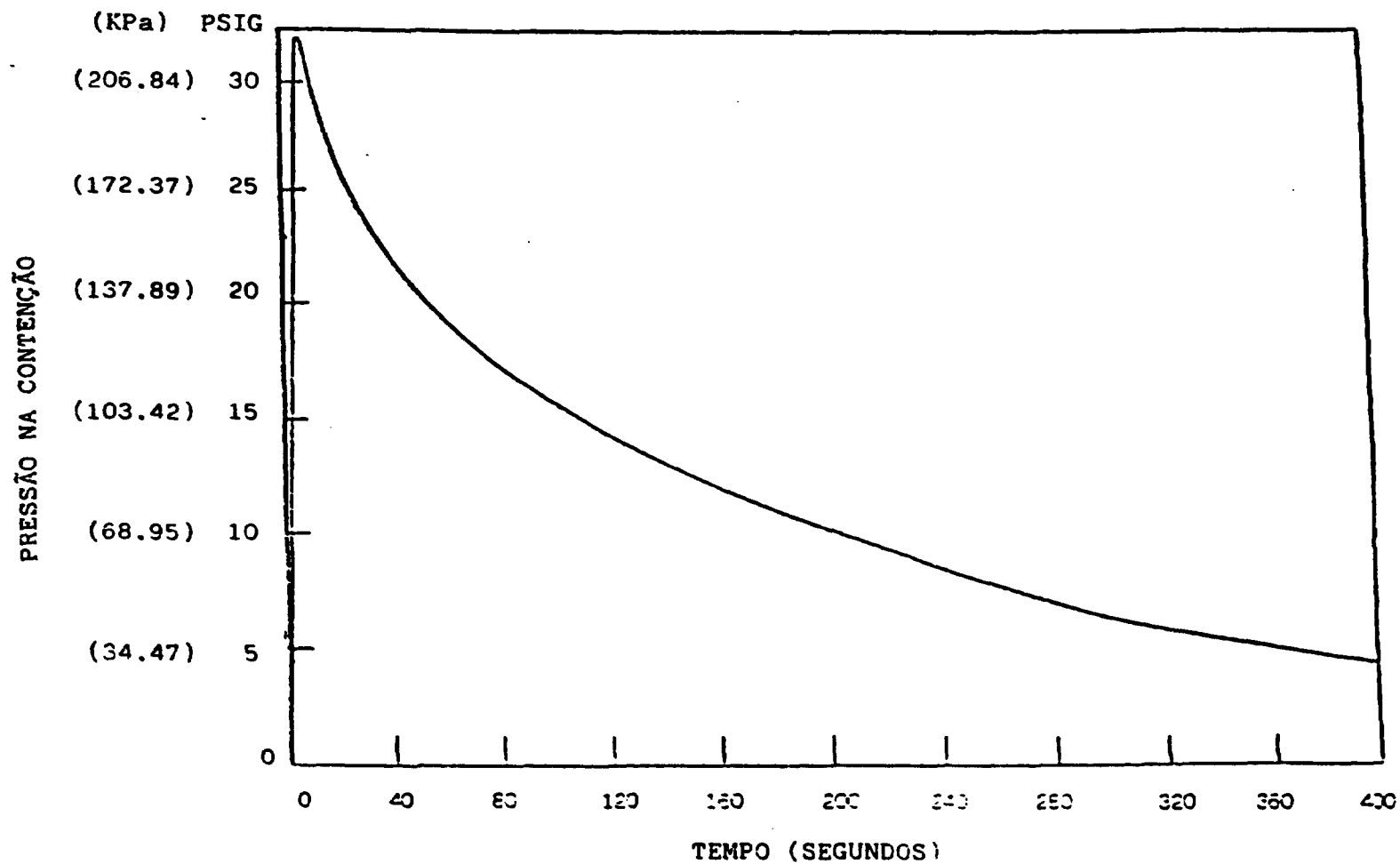


Figura 5.6. Transiente na Câmara de Contenção (CD=1.0)

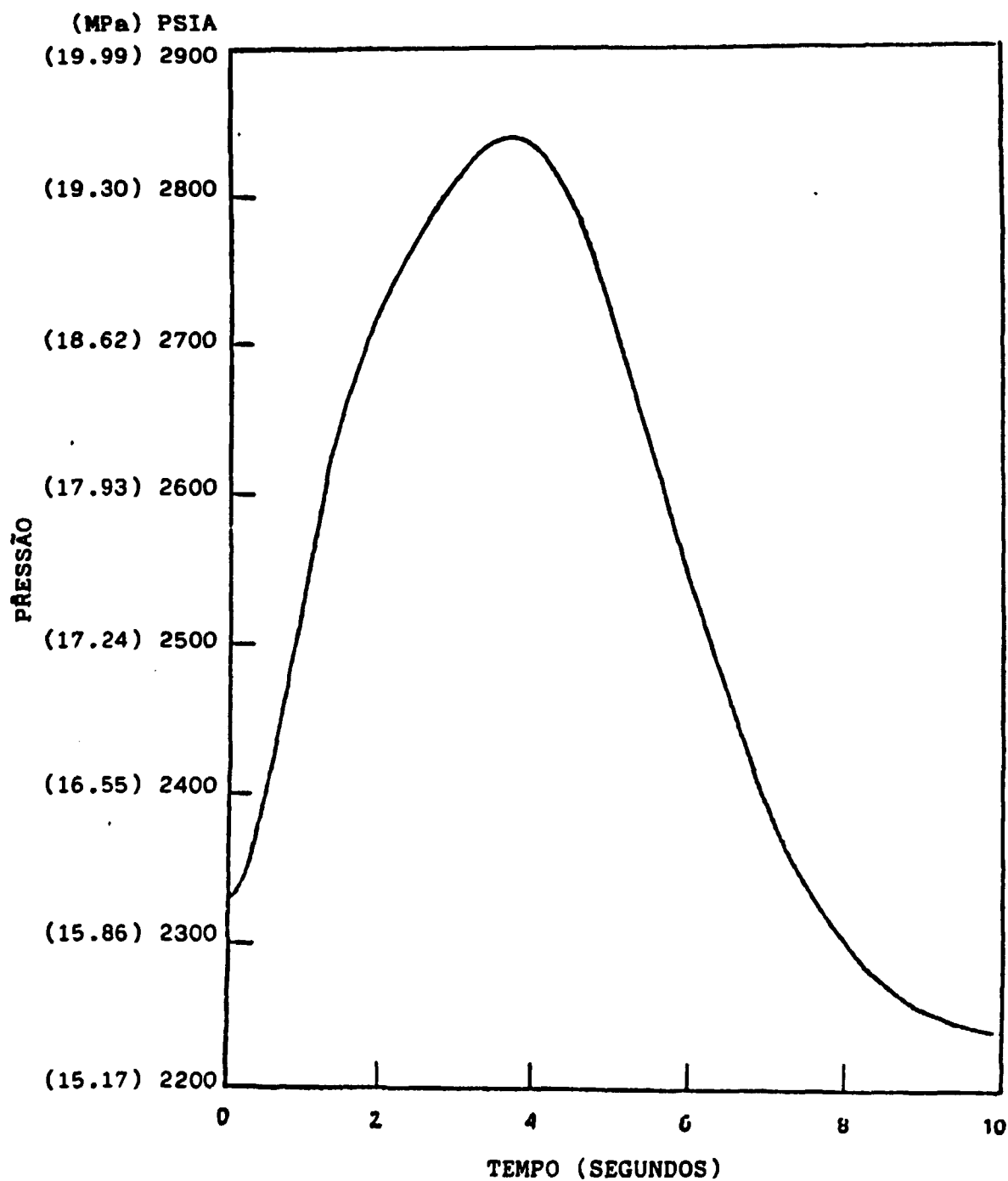


Figura 5.7. Transiente no Sistema de Refrigeração do Núcleo do Reator Devido ao Bloqueio do Rotor de uma das Duas Bombas Principais

6 MÉTODOS UTILIZADOS PARA MEDIDA E MONITORAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO

Os métodos utilizados para determinação do tempo de resposta de transdutores de pressão podem ser divididos em dois grupos: métodos diretos e métodos indiretos. A diferença básica entre os métodos é que o segundo grupo engloba tecnologias que podem ser utilizadas com a instalação em operação pois não necessitam de acesso direto ao instrumento, ao passo que os métodos conhecidos como diretos, utilizados desde que surgiu a preocupação em torno do problema de tempo de resposta, somente podem ser utilizados com a instalação desligada, uma vez que para este caso se faz necessário o acesso ao instrumento.

Dois testes são classificados como métodos diretos: o teste em rampa e o teste em degrau; e dois testes são classificados como indiretos, o teste PI e a análise de ruído. A Tabela 6.1 mostra uma comparação entre os quatro testes, que são descritos em detalhes a seguir.

Tabela 6.1. Comparação Qualitativa entre os Testes de Determinação do Tempo de Resposta de Transdutores de Pressão

TESTE	PRECISÃO	REPETIBILIDADE	ANÁLISE	APLICAÇÃO	RISCOS DE AVARIAS
DEGRAU	MODERADA	BAIXA	DIRETA	NÃO OSCILATÓRIOS	ALTOS
RAMPA	BAIXA	ALTA	DIRETA	TODOS OS TRANSDUTORES	BAIXOS
PI	ALTA	ALTA	DIRETA	BALANÇO DE FORÇAS	BAIXOS
RUÍDO	MODERADA	MODERADA	COMPUTACIONAL	BOM NÍVEL AC	BAIXOS

6.1 - TESTE EM RAMPA

O teste em rampa consiste em se aplicar ao transdutor sob investigação, e simultaneamente a outro transdutor, considerado como referência de resposta rápida, um sinal de pressão em forma de rampa, e comparar as respostas de saída dos dois instrumentos.

O método foi desenvolvido na década de 70 pela Nuclear Services Corporation, empresa contratada na época pela Electric Power Research Institute, e utiliza uma bancada experimental conhecida como "Gerador Hidráulico de Rampa (12)".

Atualmente todos os testes feitos para se determinar o tempo de resposta de sensores de pressão em centrais nucleares utilizam uma bancada similar. A vantagem do gerador é que com ele é possível se obter sinais de pressão do tipo rampa e degrau, sendo mais comum o uso do primeiro, pois na fase de projeto da instalação considera-se transientes próximos aos do tipo rampa, conforme descrito no Capítulo 5.

6.2 - TESTE EM DEGRAU

O teste em degrau é similar ao teste tipo rampa, com a diferença de que o transiente é tão rápido que para efeito prático pode ser visto como um degrau de pressão. A bancada é a mesma do teste em rampa, embora possa se utilizar um sistema mais simples, como por exemplo uma fonte de pressão e um atuador rápido tipo válvula solenóide. Este tipo de teste também avalia a grandeza conhecida como "time-to-trip", e que se for feita de maneira apropriada contabiliza o tempo de resposta de todos os componentes da cadeia de instrumentação.

A Figura 6.1, mostra o tempo de resposta total da cadeia de instrumentação de pressão até o início da ação, que pode ser, por exemplo, um bi-estável que interrompe a alimentação elétrica dos eletroímãs das barras de controle, um bi-estável que aciona o spray de emergência da câmara de contenção de uma usina nuclear ou acionamento de outro dispositivo de proteção. O tempo de resposta total da cadeia de instrumentação é determinado pela soma do tempo de resposta do transdutor (σ_{d1}), mais o tempo necessário para o acionamento do atuador (σ_{d2}).

6.3 - INTERRUPÇÃO DE POTÊNCIA

O método PI (do inglês POWER INTERRUPT), como será referenciado a partir de agora, foi desenvolvido em 1982 e consiste em interromper momentaneamente a alimentação elétrica do transdutor. O teste é feito desligando-se a alimentação elétrica por alguns segundos e então religando-a. Quando a alimentação é restituída, o sinal de saída do transdutor fornece informações que podem ser analisadas para determinar o tempo de resposta do instrumento. Este método é bastante cômodo, pois pode ser feito a partir da sala de controle da instalação, não requerendo portanto acesso físico ao instrumento.

Uma desvantagem deste teste é que ele foi validado apenas para transdutores que utilizam o princípio do balanço de forças, mais explicitamente da FOXBORO COMPANY.

A Figura 6.2 mostra uma comparação entre os resultados obtidos a partir de um transdutor de pressão quando submetido a um teste PI e a um teste em degrau. Nela fica evidente que as informações fornecidas são semelhantes e que o teste PI fornece as informações dinâmicas essenciais para determinar o tempo de resposta do instrumento (13).

A validade do teste PI foi avaliada em laboratório comparando-se os resultados obtidos a partir de testes diretos, e demonstrou resultados para tempos de resposta de transdutores de pressão de balanço de forças com cerca de ± 0.1 segundos de diferença em relação aos resultados obtidos com testes do tipo rampa e degrau (9,10,14).

6.4 - ANÁLISE DE RUÍDO

A análise de ruído consiste em se monitorar as flutuações naturais que existem no sinal dos transdutores de pressão. Estas flutuações são devido a turbulências ocasionadas pela passagem da água pelo processo, transferência de calor do núcleo do reator ou da bomba principal, e outros fenômenos naturais ao processo. Estas flutuações, comumente denominadas de ruído, são extraídas do sinal de saída do transdutor,

removendo a componente DC do sinal e amplificando a componente AC. A componente DC é removida passando o sinal de saída do transdutor por um filtro passa-alta, geralmente ajustado em cerca de 0.02 Hz.

A componente AC passa por um filtro passa-baixa para remover os ruídos elétricos de altas frequências e interferências. O sinal pode ser então digitalizado por um conversor analógico-digital e armazenado em disquetes de computador para análise subsequente.

Esta análise pode ser feita no domínio do tempo ou no domínio da frequência, e é baseada na hipótese de que a característica dinâmica do transmissor é linear. Para a análise no domínio da frequência, obtêm-se a densidade espectral de potência (do inglês "Power Spectral Density" - PSD) a partir dos sinais de ruído através do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier. Uma função matemática apropriada é então utilizada para ajustar o PSD, do qual pode-se calcular o tempo de resposta do transdutor.

No domínio do tempo é utilizado o modelo matemático Auto-Regressivo (AR), descrito na referência (15), que consiste em representar o sinal do transdutor através de séries temporais auto-regressivas para obter a resposta impulso e a partir disso obter a resposta em degrau do transdutor, e assim calcular o seu tempo de resposta.

A partir dos resultados obtidos em testes de validação em laboratório, a técnica de análise de ruído demonstrou resultados para tempos de resposta de transdutores de pressão

com cerca de ± 0.1 segundos de diferença em relação aos resultados obtidos com testes diretos do tipo rampa e degrau (9,10,14).

A Figura 6.3 mostra uma ilustração do procedimento quando se utiliza análise em frequência.

6.5 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DE CADA MÉTODO

Cada teste apresenta suas vantagens e desvantagens. Cabe ao proprietário da instalação propor o melhor programa de testes, que pode envolver dois ou mais tipos de testes, e submeter o mesmo para a aprovação do órgão licenciador. A medida do tempo de resposta da instrumentação ligada ao sistema de proteção de uma instalação nuclear é dividida em duas fases distintas:

Na primeira fase é feita a medida do tempo de resposta de através de métodos diretos. No caso de transdutores de pressão utiliza-se o método abordado neste trabalho, ou seja o teste em rampa. Estes resultados serão utilizados como parâmetros de referência para a fase posterior, descrita a seguir.

Numa fase posterior, o método de análise de ruído e o teste PI são utilizados para se "monitorar" possíveis alterações no tempo de resposta do instrumento. Ou seja os resultados obtidos na primeira fase são considerados como valores absolutos, e a partir daí faz-se a monitoração para

verificar se houve alteração nos mesmos. Em caso de ficar constatado que houve alterações, deve-se fazer uma nova medida direta para se verificar se o tempo de resposta continua dentro das especificações.

O intervalo de tempo entre cada ciclo de testes de tempo de resposta de transdutores de pressão ligados ao sistema de proteção não é especificado pela **NRC (Nuclear Regulatory Commission)**, ela especifica somente que o aumento nos casos de falhas de instrumentos deve ser detectado com antecedência.

O que se verifica como tendência global é que estes testes sejam feitos a cada parada para troca de combustível nuclear. Tal tendência baseia-se em pesquisas realizadas em laboratório, e a partir de pesquisas bibliográficas de relatórios gerados por órgãos licenciadores (**Licensee Event Reports - LER**), que reportam problemas ocorridos em instalações nucleares, envolvendo transdutores de pressão utilizados para medida de nível, pressão e vazão, com particular ênfase dada às falhas por envelhecimento, falhas de fabricação e manuseio impróprio destes transdutores (2,9,10).

As características de cada teste são discutidas a seguir.

6.5.1 - MÉTODO DIRETO

A dificuldade de utilização dos métodos diretos (rampa e degrau) é que eles exigem acesso ao instrumento, o que acarreta a necessidade da instalação estar desligada, além do que este método não contabiliza o tempo de resposta devido à linha que liga o processo ao transdutor.

Outro problema deste método é que a exigência de acesso ao instrumento significa, em alguns casos, a necessidade de se trabalhar em condições ambientais adversas, como as encontradas na câmara de contenção, por exemplo, que apresenta doses de radiação, falta de ventilação e temperaturas que impedem uma permanência prolongada. Além disso o perigo constante de contaminação exige uso de luvas de borracha e vestimentas especiais que dificultam a mobilidade e a manipulação do gerador e outros equipamentos necessários, previamente envolvidos em embalagens plásticas.

A seguir são discutidas algumas características adicionais dos testes classificados como diretos.

TESTE EM RAMPA

- O teste em rampa é o mais utilizado, pois conforme visto no Capítulo 5, na fase de projeto da instalação considera-se transientes próximos aos do tipo rampa;

- Os riscos de avarias aos transdutores investigados são mínimos;

- É o único teste aceito pelos órgãos licenciadores para medida de tempo de resposta, até o momento. Por ser considerado como teste "padrão", pois mede o tempo de resposta "real" do transdutor, estes órgãos exigem que a medida seja feita utilizando este teste, e somente a partir daí pode-se utilizar outro método para monitorar a degradação do tempo de resposta do instrumento.

- O resultado da análise é simples e de fácil interpretação

TESTE EM DEGRAU

- Oferecem riscos de avarias aos transdutores investigados;

- É válido somente para sistemas dinâmicos lineares de primeira ordem, e deve ser utilizado com cuidado para obter o tempo de resposta de transdutores de pressão, pois em geral estes transdutores são sistemas dinâmicos de segunda ordem ou de ordem superior.

- O resultado da análise é simples, porém nem sempre de fácil interpretação.

6.5.2 - MÉTODOS INDIRETOS

A grande vantagem dos métodos indiretos é que eles podem ser executados a partir da sala de controle, sem que seja necessário o acesso à contenção e podem ser realizados com a instalação em operação. A seguir são apresentados outras características dos métodos indiretos.

A principal restrição quanto à utilização destes métodos para medida de tempo de resposta, é que até o momento eles foram validados apenas para monitorar o tempo de resposta dos transdutores de pressão para verificar se houve algum tipo de degradação, tornando-se necessário então que se faça primeiro a medida pelo teste em rampa, o que servirá como parâmetro de base ("baseline").

ANÁLISE DE RUÍDO

- O método de análise de ruído não pode ser aplicado em casos onde o nível AC do sinal elétrico, proveniente do transdutor é muito baixo ("Narrowband"). Casos típicos deste tipo de problema são observados, por exemplo, nos transdutores de pressão da câmara de contenção e dos medidores de nível dos tanques do Sistema de Injeção de Emergência (SIE).

- Embora a técnica de análise de ruído seja aplicável para todos os transdutores de pressão, ainda não foi detectada a razão pela qual o algoritmo matemático não consegue modelar convenientemente alguns dos sensores, ou seja não existe um completo domínio sobre o método.

TESTE PI

A mesma restrição em relação ao método de análise de ruído se aplica também no caso do teste PI, ou seja, **este teste somente é válido apenas para monitorar degradações do tempo de resposta de transdutores de pressão, e não para a sua determinação.** A exigência de uma "baseline" para a implantação deste método também é feita pelos órgãos licenciadores.

O teste somente pode ser feito com sensores de tipo balanço de forças da marca FOXBORO e mesmo assim não pode ser utilizado quando o teste envolve decréscimos de pressão e quando o sinal de saída apresenta fortes oscilações na fase inicial do transiente, como por exemplo "overshoot".

A **Figura 6.4** mostra duas saídas típicas de um teste PI, uma saída com "overshoot" (a) e outra com saída normal (b).

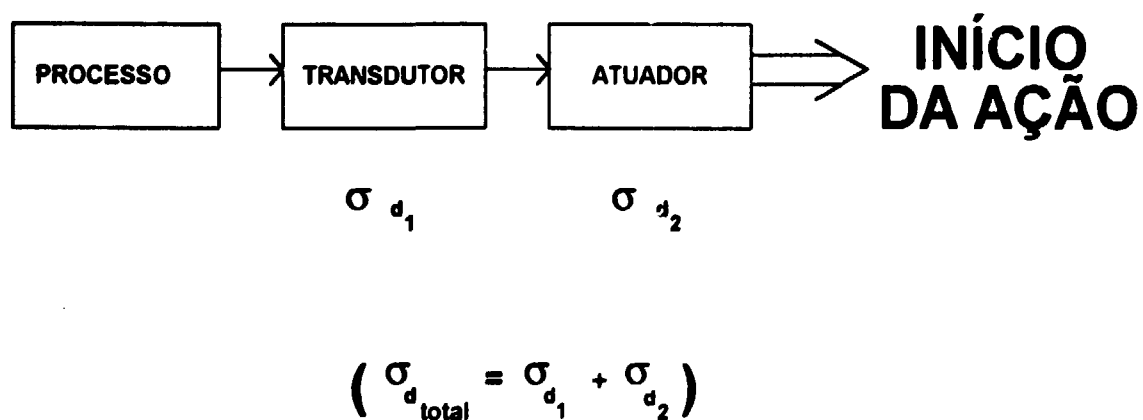


Figura 6.1. TEMPO DE RESPOSTA DE UMA CADEIA DE INSTRUMENTAÇÃO

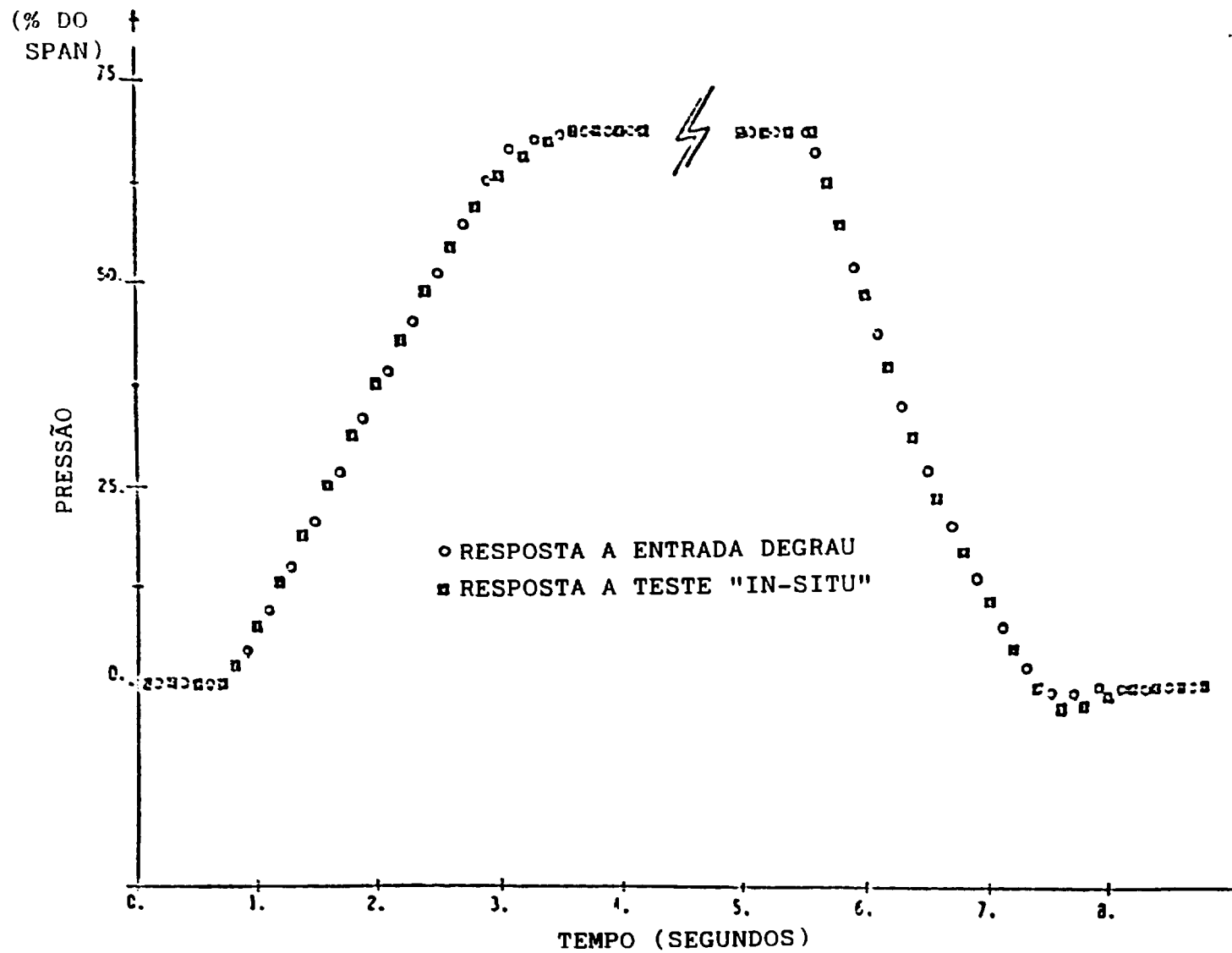


Figura 6.2. Comparação Entre Teste PI e Teste em Degrau

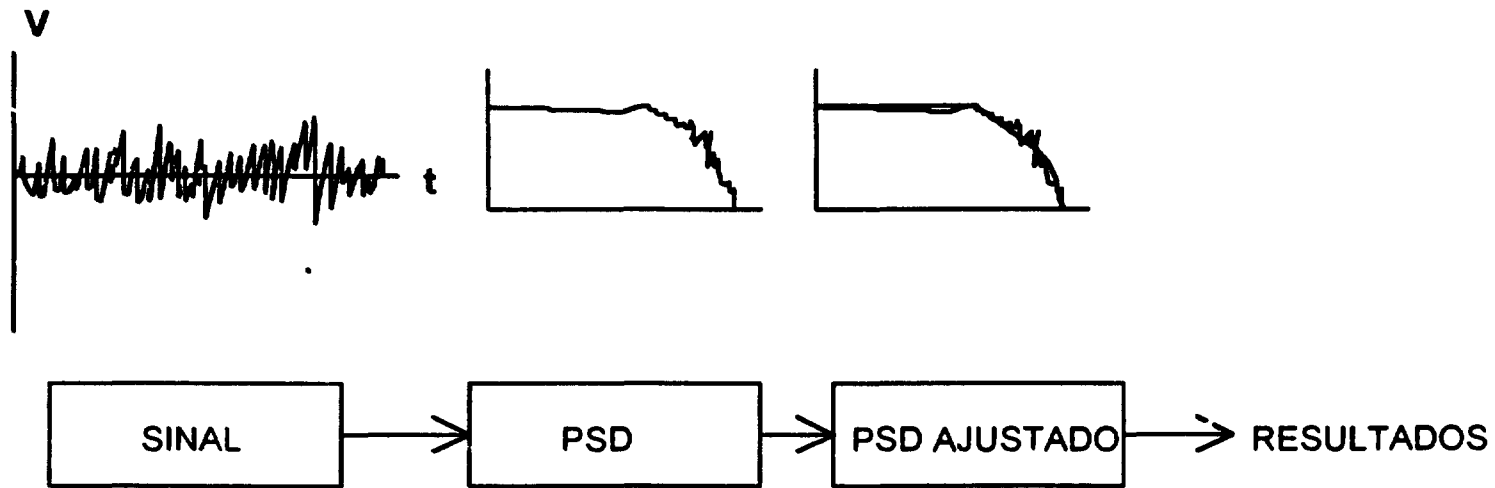
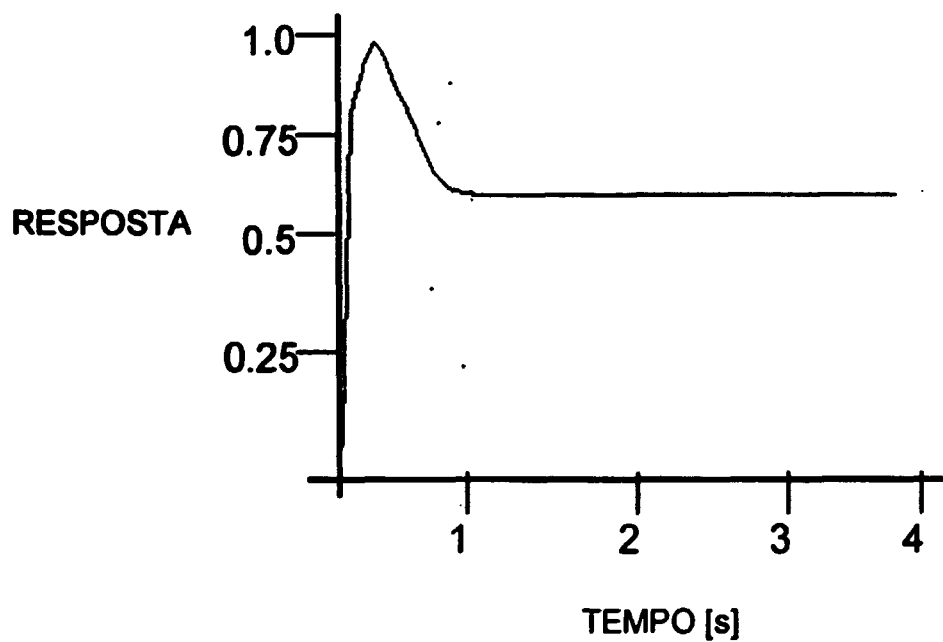
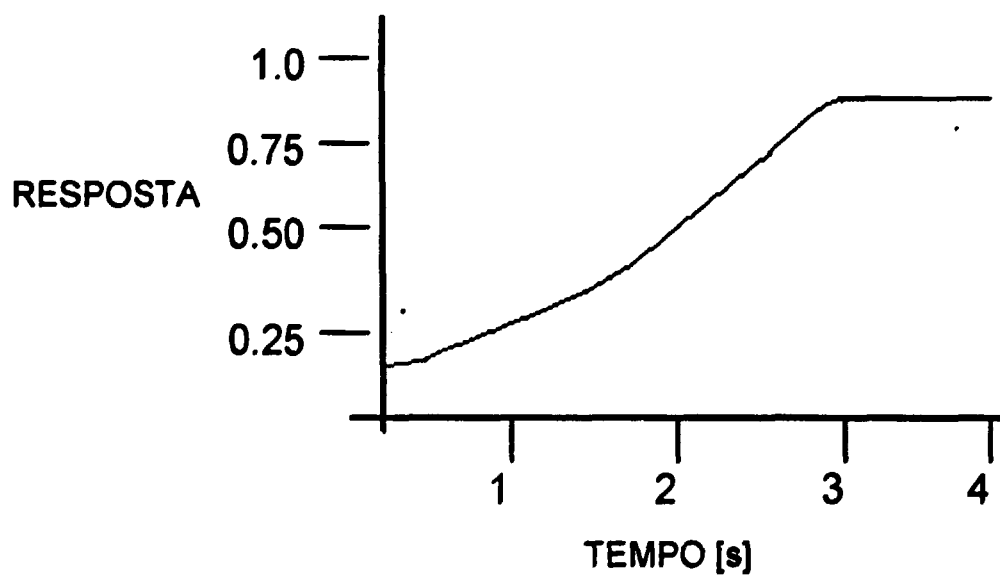


Figura 6.3. Procedimento Utilizando-se Análise de Ruído



(a) Resposta com "Overshoot"



(b) Resposta Normal

Figura 6.4. Resultado Típico de um Teste PI

7 DESCRIÇÃO DO GERADOR HIDRÁULICO DE RAMPA

Como já mencionado, a bancada de testes conhecida como gerador hidráulico de rampa foi desenvolvida na década de 70 pela Nuclear Services Corporation, empresa contratada na época pela Electric Power Research Institute, em atendimento às determinações feitas pela "Nuclear Regulatory Guide 1.118" (3).

A "U.S. Nuclear Regulatory Commission" forneceu então um novo enfoque para a determinação do tempo de resposta de sensores, a partir do qual foram adotados procedimentos de testes baseados em normas. Estas normas exigem explicitamente que as usinas nucleares possuam um programa de testes periódicos para monitoração do tempo de resposta dos transdutores ligados ao sistema de proteção da instalação, para garantir que o tempo de resposta dos canais de segurança do reator permaneça dentro dos limites estabelecidos nas especificações técnicas da instalação.

A principal exigência é a de que os testes devem ser feitos "in-situ", ou seja, com o transdutor instalado no local de operação normal, e em casos em que isto não seja possível, a medida deve ser feita em laboratório, mantendo porém as

condições ambientais do teste as mais próximas possíveis àquelas dos locais de trabalho dos transdutores, tornando-se necessário então o desenvolvimento de um gerador que pudesse ser levado ao local de trabalho do instrumento, e que fosse capaz de gerar sinais de pressão que pudessem simular os transientes de pressão postulados e , conseqüentemente, determinar o tempo de resposta dos transdutores de pressão.

Em função do ambiente adverso encontrado em alguns dos setores de uma central nuclear, nos quais o gerador deve ser utilizado, na fase de projeto do gerador foram necessários alguns cuidados em relação às características que ele deveria apresentar, de maneira a facilitar a sua utilização e operação. Assim sendo, na fase de projeto do gerador foram adotados os seguintes critérios:

FACILIDADE DE TRANSPORTE: o gerador deve ser leve e compacto, para facilitar o transporte manual até os locais de trabalho dos transdutores, pois os instrumentos podem estar localizados em pontos distantes uns dos outros, e muitas vezes em setores diferentes.

FACILIDADE DE MANUSEIO E OPERAÇÃO: Para trabalhos em uma central nuclear, o gerador deve ser de fácil manuseio, principalmente no que se refere às tomadas para entrada de suprimento de pressão e de conexão ao instrumento a ser analisado.

Em ambientes sujeitos à contaminação radioativa, é necessário que o gerador seja envolvido por uma embalagem plástica para evitar a sua contaminação, dificultando o seu manuseio e a sua operação.

CONFIABILIDADE E FACILIDADE DE MANUTENÇÃO: o gerador deve ter baixo índice de interrupção por quebra, e ser resistente a temperaturas elevadas, como as encontradas no interior da câmara de contenção. Deve ainda ser robusto pois está sujeito a choques mecânicos com outros equipamentos, tubulações, escadas, etc, que podem ocorrer, principalmente em locais de difícil acesso.

De acordo com a definição descrita no **Capítulo 2 (seção 2.2)** o **tempo de atraso**, é definido como o atraso assintótico entre a resposta de um transdutor de referência e um transdutor sob investigação, quando submetidos simultaneamente a um sinal de entrada em rampa.

Portanto, para se obter o tempo de atraso de um transdutor, faz-se necessário a utilização de um transdutor cuja resposta seja considerada mais rápida, quando comparada com o tempo de resposta de transdutores comuns de processo. O transdutor de referência escolhido foi um transdutor de relutância variável da **Validyne Engineering Corporation**, modelo **DP15TL**, que possui um "kit" de diafragmas para que o transdutor possa ser utilizado em diversos níveis de pressão.

A Figura 7.1 mostra um esquema simplificado do gerador, onde se destacam os cilindros hidráulicos (A_1) e acumulador (A_2), cujas funções são descritas na seção 7.2.

A Figura 7.2 mostra uma visão geral da parte frontal do gerador, com o manômetro ao centro e as válvulas que servem para configuração e operação da bancada.

A Figura 7.3 mostra uma visão geral da parte interna do gerador, onde pode-se ver os cilindros A_1 (à direita) e A_2 (à esquerda), e a válvula solenóide (no alto à esquerda).

As principais características do gerador hidráulico construído são:

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS:

altura: 440 mm;

largura: 410 mm

profundidade: 238 mm (incluindo hastes das válvulas);

peso estimado: 30 kg

material utilizado na fabricação:

MATERIAIS:

tubulação de 1/8 de polegada, em aço inox;
válvulas agulha, com corpo em aço inox;
válvulas de esfera de acionamento manual
(acionamento rápido), com corpo em aço inox;
válvula solenóide (acionamento elétrico);
manômetro tipo Bourdon, com faixa de 0 a 250 kgf/cm²;
conexões em aço inox;
2 cilindros (um hidráulico e outro acumulador) em aço
inox para trabalhos com pressões da ordem de
200 kgf/cm²;

7.1 - OPERAÇÃO DO GERADOR HIDRÁULICO DE RAMPA

O gerador hidráulico foi projetado para gerar sinais do tipo rampa e degraus positivos e negativos. Em virtude do tipo de válvula solenóide empregada no gerador não é possível gerar sinais de rampa negativa.

Sua operação é feita através de válvulas manuais e de uma válvula solenóide, responsável pelo início do transiente do tipo rampa como veremos a seguir.

7.1.1 - OPERAÇÃO EM MODO RAMPA

Conforme visto na Figura 7.1, o gerador compreende dois cilindros: um cilindro hidráulico (A_1) e um cilindro acumulador (A_2), este último responsável pelo suprimento de pressão durante o transiente.

Uma válvula agulha (V-05) posicionada na saída do acumulador serve para controlar e ajustar a inclinação da rampa, e uma válvula solenóide em série à esta válvula serve para dar início ao transiente.

A geração da rampa de pressão é feita pressurizando todo o sistema utilizando ar comprimido ou nitrogênio. Com a válvula solenóide e a válvula de desvio (V-06) fechadas, isolando o cilindro pneumático, ajusta-se então a pressão no cilindro (A_1) até a pressão inicial, menor que a pressão no cilindro A_2 . Uma vez ajustada a rampa, abre-se a válvula solenóide através da botoeira para dar início ao transiente, que como foi descrito anteriormente no Capítulo 2 (seção 2.2), é enviado simultaneamente ao transdutor analisado e ao transdutor de referência, ambos conectados na saída do cilindro A_1 .

Ao se utilizar o gerador para determinar o tempo de resposta de transdutores de pressão, é importante que o sinal gerado pelo mesmo cresça linearmente. Esta condição é possível ao se estabelecer uma diferença de pressão entre os cilindros, que propicie a formação de escoamento sônico na válvula V-05, posicionada na saída do cilindro A_1 , e garante que a vazão na

saída da válvula é a maior possível, permanecendo constante durante boa parte do transiente.

Conforme descrito no Anexo A, para a formação de escoamento sônico, é necessário que a pressão no cilindro A₂ seja superior a aproximadamente duas vezes a pressão no cilindro hidráulico (em valores absolutos) (16,17,18). Na prática, para que a relação seja mantida durante todo o transiente, Cain (12) concluiu que a seguinte relação empírica deve ser observada:

$$|P_P - P_H| = 10 |P_{SP} - P_H| \quad (7.1)$$

onde:

P_P é a pressão inicial no cilindro acumulador;

P_H é a pressão no cilindro hidráulico, arbitrariamente fixado em 5% do fim de faixa;

P_{SP} é a pressão de set-point do transdutor.

A equação 7.1 serve para calcular os pontos de referência para a determinação do tempo de resposta, e garante vazão de escoamento constante na saída da válvula V-05.

É importante salientar que as pressões calculadas pela equação 7.1 estão em pressão absoluta.

7.1.2 - OPERAÇÃO EM MODO DEGRAU

O gerador hidráulico pode fornecer sinais, que do ponto de vista prático, podem ser considerados como transientes do tipo degrau. Este tipo de sinal pode ser gerado obedecendo o mesmo procedimento descrito na seção anterior (modo rampa), mas ao invés de se acionar a válvula solenóide, aciona-se a válvula V-06 (válvula de acionamento rápido).

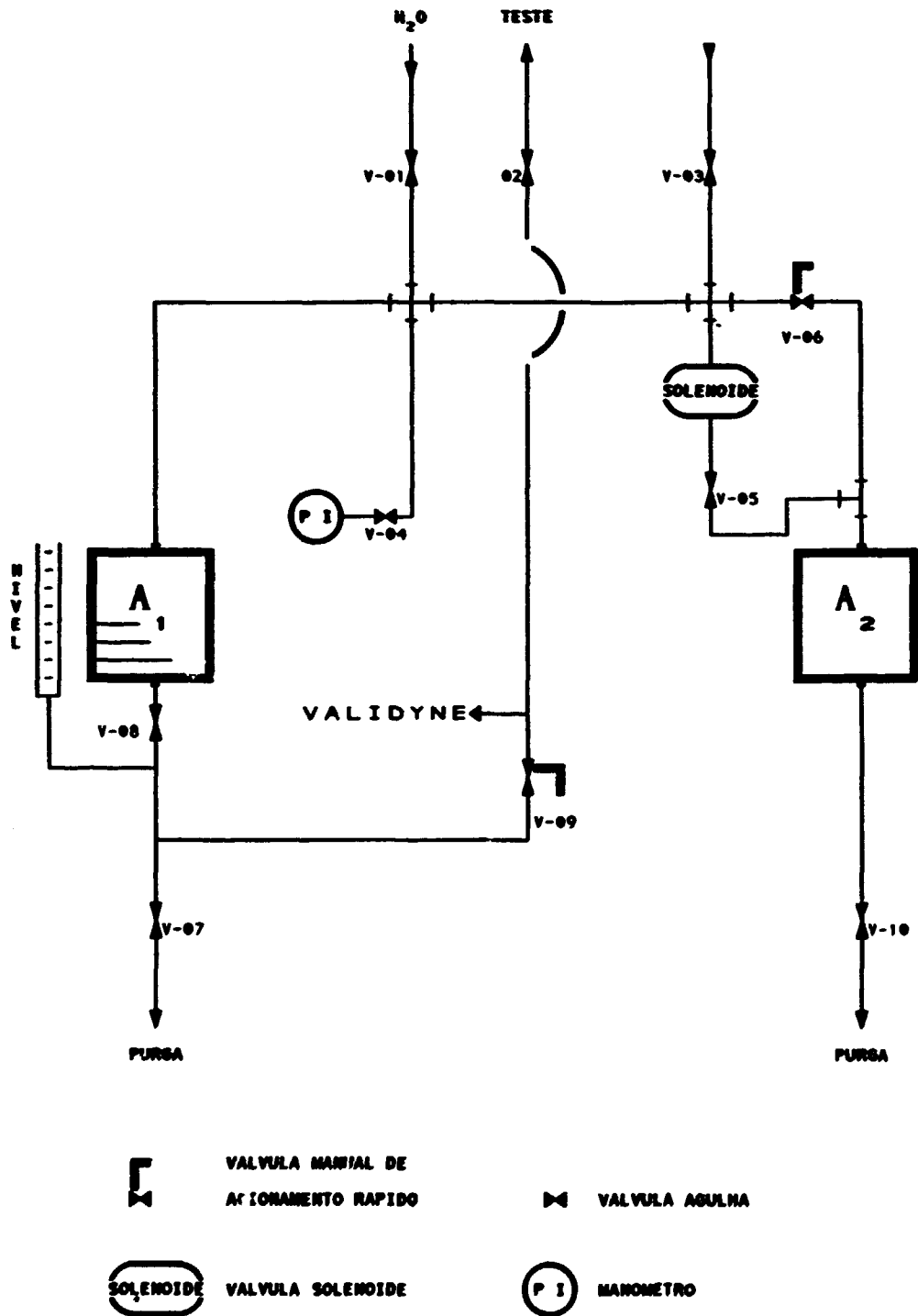


Figura 7.1. Esquema Simplificado Do Gerador Hidráulico De Rampa

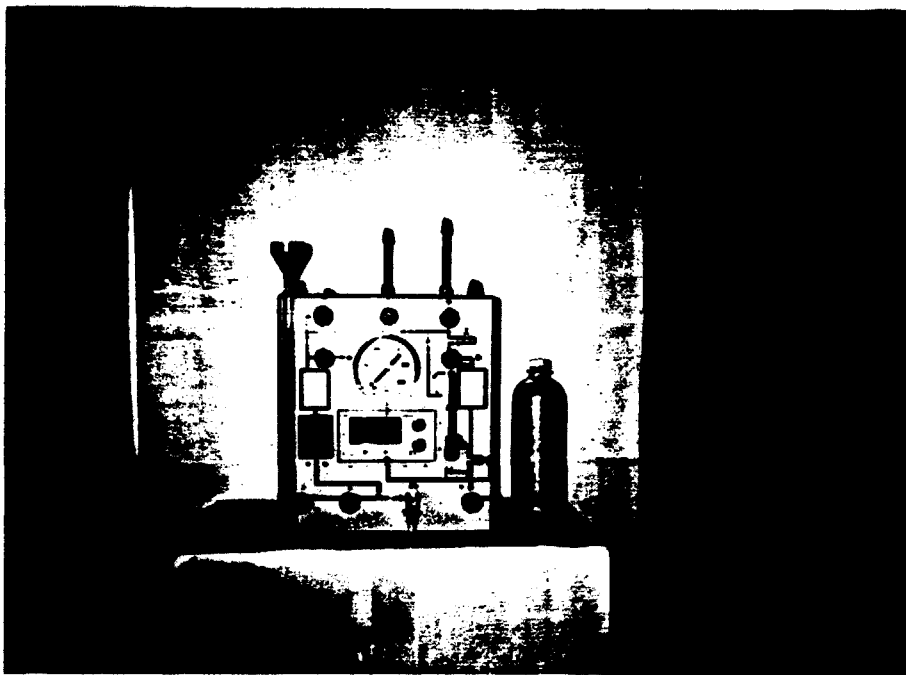


Figura 7.2 Visão Geral Frontal do Gerador Hidráulico de Rampa



Figura 7.3. Visão Geral Interna do Gerador Hidráulico de Rampa

8 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Como descrito anteriormente (6.5.1), o método de medida direta é utilizado para medir o tempo de resposta "real" do transdutor, e serve como base para validação de outros métodos.

Este teste consiste basicamente em aplicar um sinal de pressão na forma de uma rampa diretamente na entrada de pressão do transdutor, sendo conhecido também como "sinal de substituto". A diferença de tempo entre o instante que o transdutor de referência alcança um valor pré-determinado e o tempo que o transdutor analisado alcança aquele mesmo valor é denominado de "tempo de atraso" do transdutor.

Uma vez montada a bancada e resolvidos os problemas de vazamentos, passou-se ao programa experimental em laboratório, que constou de se medir o tempo de atraso de 11 (dez) transdutores de pressão, todos na faixa entre 0 e 400 KPa, e o estudo das "condições" que afetam o mesmo. Dos 11 transdutores utilizados no programa experimental, dois são qualificados para utilização em instalações nucleares o **Barton 764** e o **Foxboro E13DM**, e o restante, utilizados em instalações convencionais. Com exceção do Barton, que nos foi emprestado por **Furnas**

Centrais Elétricas S.A. já calibrado, os outros transdutores foram calibrados pelo Laboratório de Aferição e Calibração (LAC) da COPESP. Esta calibração se faz necessária para verificar e corrigir desvios do sinal de saída do instrumento quando submetido a valores conhecidos de pressão.

A Tabela 8.1 mostra as principais características dos transdutores utilizados nos estudos.

Deve-se destacar que a preparação do gerador hidráulico de rampa e dos equipamentos necessários para os testes requer alguns cuidados preliminares, que abrange a calibração do transdutor a ser analisado e do transdutor de referência, o controle da pressão de teste para não haver sobrepressurização, a calibração dos canais do registrador gráfico para a faixa de interesse com os devidos ajustes de ganho e por último a alimentação elétrica dos transdutores.

Conforme citado no Capítulo 7 o transdutor de referência possui um jogo de diafragmas que são utilizados para adequar a sua faixa de pressão de trabalho à faixa de trabalho do transdutor analisado. Portanto, para cada nova faixa de pressão tomou-se o cuidado de substituir o diafragma para adequá-lo à pressão a ser submetida durante os testes.

Tabela 8.1 Principais Características dos Transdutores Analisados.

FABRICANTE	MODELO	FAIXA DE PRESSÃO (KPa)	PRESSÃO MEDIDA	TIPO DE SENSOR
ITT/BARTON	764	0-392	DIFERENCIAL	STRAIN GAGE
FISHER	1151DP7E22LMMB	0-1000	DIFERENCIAL	CÉLULA CAPACITIVA
SCHLUMBERGER	PDH3200/030/72	0-400	DIFERENCIAL	CÉLULA CAPACITIVA
SMAR	LD200	0-400	DIFERENCIAL	CÉLULA CAPACITIVA
SMAR #1	LD300 #1	0-400	ABSOLUTA	CÉLULA CAPACITIVA
SMAR #2	LD300 #2	0-400	ABSOLUTA	CÉLULA CAPACITIVA
SMAR #3	LD300 #3	0-400	ABSOLUTA	CÉLULA CAPACITIVA
ENGISTREL	PD4BL228UNCC	0-25	DIFERENCIAL	CÉLULA CAPACITIVA
TRANSMITEL	B1151DP4E22M1B3	0-25	DIFERENCIAL	CÉLULA CAPACITIVA
ECKARDT	5 153 931	0-25	DIFERENCIAL	CÉLULA CAPACITIVA
FOXBORO	E13DM	0-10	DIFERENCIAL	BALANÇO DE FORÇAS

A calibração do transdutor de referência pode ser feita de duas maneiras distintas:

1) Calibração em laboratório, utilizando as indicações de um instrumento padrão;

2) Calibração do transdutor de referência utilizando o as indicações do próprio transdutor analisado como referencial.

O último procedimento é mais cômodo pois permite que a calibração seja feita "in situ", possibilitando o teste de instrumentos com diferentes níveis de pressão de trabalho, sem a necessidade de retornar ao laboratório para calibração na nova faixa de pressão. Esta facilidade é particularmente importante quando lembramos que o acesso à contenção do reator envolve diversos procedimentos para proteção dos equipamentos e do pessoal envolvido nas medidas, devido ao risco de contaminação radioativa, diminuindo o número de entradas e saídas da contenção.

As Figuras 8.1 e 8.2 mostram um esquema simplificado do arranjo experimental.

Para a realização dos testes foi adotado o seguinte procedimento:

Como mostra a Figura 8.3, para os testes envolvendo transientes do tipo rampa, faz-se o registro dos valores correspondentes às pressões de set-point " P_{sp} " (valor de

pressão utilizado para determinação do tempo de atraso), pressão de rampa " P_{rampa} " (utilizado para o cálculo da taxa de subida de rampa, a partir do momento de início do teste) e pressão inicial no cilindro hidráulico " $P_{inicial}$ ". Estes parâmetros são registrados em ambos os canais registrador, correspondentes ao transdutor analisado e ao transdutor de referência (Validyne). Como o tempo de atraso é obtido através da comparação entre a resposta do transdutor de referência a resposta do transdutor analisado, o registro destes parâmetros facilita a interpretação dos resultados e a obtenção do tempo de atraso.

Uma vez montado o arranjo experimental, passou-se aos testes, propriamente ditos, que consistiu de:

- 1) Medida do tempo de atraso, utilizando o teste em rampa;
- 2) Medida da constante de tempo* , utilizando o teste em degrau (positivo e negativo);
- 3) Medida do tempo de resposta através do método PI;
- 4) Estudo da influência da existência de bolhas na linha de pressão;
- 5) Estudo da influência do coeficiente de "damping" do instrumento na resposta do mesmo.

* Neste estudo a constante de tempo, independente da sua definição, foi adotada como sendo o intervalo de tempo necessário para que o sensor registre 63.2% do valor do degrau.

6) Estudo da influência do pote de selagem no tempo de resposta.

8.1 RESULTADOS

Para verificar a influência da taxa de elevação da rampa de pressão no tempo de atraso dos transdutores analisados, foram aplicados na entrada dos transdutores de referência e do transdutor analisado sinais com diferentes taxas de pressão. Os resultados obtidos estão na **Tabela 8.2**. Nesta as taxas de rampa e os tempos de atraso listados em cada linha se correspondem, respectivamente. Os valores de tempo de atraso listados são para rampas positivas de pressão.

Os transdutores foram submetidos a testes do tipo degrau de pressão, que consistiram na aplicação de degraus positivos e negativos, que serviram para avaliar a capacidade de resposta dos transdutores quando submetidos a transientes rápidos de pressão, além de servir para verificar a linearidade destes transdutores. A **Tabela 8.3** mostra os resultados obtidos para a constante de tempo utilizando degraus positivos e negativos.

Conforme já citado, o teste PI é feito desligando a alimentação elétrica do transdutor pressurizado e após alguns segundos tornando a ligar a alimentação elétrica do mesmo. A

resposta do transdutor é registrada e assim pode-se determinar o seu tempo de resposta. Este teste foi aplicado ao transdutor que utiliza o princípio do balanço de forças e os resultados foram comparados com os testes em rampa e degrau. Os resultados estão mostrados na Tabela 8.4.

Alguns transdutores possuem um "damping" eletrônico, que pode ser ajustado através de um potenciômetro.

A Tabela 8.5 mostra o resultado obtido num experimento realizado no qual se variou o "ajuste de damping" de dois transdutores, e onde ficou claro que o sistema eletrônico de um transdutor pode, dependendo do ajuste, ser o maior responsável pelo tempo de atraso.

Para avaliar a influência do pote de selagem no tempo de resposta do transdutor da ITT/Barton, foram feitos testes com e sem o pote. Os resultados estão sintetizados na Tabela 8.6.

Tendo em vista que a existência de bolhas de ar afeta o tempo de resposta dos transdutores de maneira negativa, algumas bolhas de ar foram injetadas na linha de pressão para se avaliar a influência das mesmas. Foram injetadas bolhas de ar com dois comprimentos distintos: 25 milímetros e 550 milímetros (medidos com o sistema despressurizado). Os resultados obtidos estão na Tabela 8.7.

Tabela 8.2. Tempo de Atraso dos Transdutores Analisados

FABRICANTE	TAXA DE SUBIDA DA RAMPA (KPa/s)	TEMPO DE ATRASO (ms)	INCERTEZA (ms)
ITT/BARTON	6;28	160;160	40
FISHER	10;21;26;32;40	40;40;40;40;40	20
SCHLUMBERGER	47;119;157	20;20;30	20
SNAR	64;96	80;80	20
SNAR #1	44;68;139	900;860;860	20
SNAR #2	34;74;90;104;313	860;840;860;890;870	40
SNAR #3	46;93;119	920;920;910	10
ENGISTREL	1;2;7;21	120;120;130;130	10
TRANSMITEL	2;6	160;160	10
ECKARDT	3;9;10;18	440;320;340;260	10
FOXBORO	4;4.5;12.5;25	320;300;300;290	10

Tabela 8.3. Constante de Tempo Para Degraus Positivos e Negativos

FABRICANTE	DEGRAU POSITIVO (ms)	DEGRAU NEGATIVO (ms)
SCHLUMBERGER	160 ± 5	115 ± 5
SMAR	67 ± 5	110 ± 5
SMAR #1	986 ± 10	980 ± 10
SMAR #2	967 ± 10	1030 ± 10
SMAR #3	983 ± 10	1010 ± 10
ENGISTREL	115 ± 5	160 ± 10
TRANSMITEL	190 ± 5	240 ± 10
ECKARDT	430 ± 5	480 ± 10
FOXBORO	700 ± 5	825 ± 10

Tabela 8.4. Resultados do Teste PI

FOXBORO MOD. E13DM	
# DO TESTE PI	TEMPO DE RESPOSTA (ms)
1	570 ± 5
2	620 ± 5
3	580 ± 5
4	580 ± 5
5	580 ± 5
6	580 ± 5
7	590 ± 5
8	650 ± 5

Tabela 8.5. Influência do Coeficiente de Damping no Tempo de Resposta

FISHER MOD. 1151DP7E22LMB	
DAMPING (%)	TEMPO DE ATRASO (ms)
0	40 ± 20
50	800 ± 40
100	1280 ± 40

SMAR MOD. LD200D04	
DAMPING (%)	TEMPO DE ATRASO (ms)
0	40 ± 10
25	800 ± 40
40	1000 ± 40
50	1240 ± 40

Tabela 8.6. Influência do Pote de Selagem no Tempo de Resposta

BARTON MOD. 764

	TEMPO DE ATRASO (ms)	CONSTANTE DE TEMPO (ms)
SEM POTE DE SELAGEM	< 10	30 ± 20
COM POTE DE SELAGEM	160 ± 40	1640 ± 20

Tabela 8.7. Influência de Bólhas de Ar no Tempo de Resposta

BARTON MOD. 764

COMPRIMENTO DA BÓLHA (mm)	TEMPO DE ATRASO (ms)	CONSTANTE DE TEMPO (ms)
0	< 10	30 ± 20
25	< 10	25 ± 20
550	50 ± 20	107 ± 20

8.2 - ANÁLISE DE INCERTEZAS

Nos resultados apresentados para os tempos de resposta dos transdutores, foi considerado como incerteza de medida, a metade da menor divisão da carta utilizada para o registro dos sinais de saída dos instrumentos analisados, somada à metade da menor divisão da carta utilizada para o instrumento de referência.

Em ambos os casos, a resolução é função da velocidade do papel, ou seja, para uma velocidade de 25 mm/s, e sendo 1 milímetro a menor divisão do papel no eixo dos tempos, temos que a incerteza na medida é de 40 milisegundos.

Se a velocidade do papel for de 100 mm/s a incerteza passa a ser então de 10 milisegundos.

Não foram considerados efeitos de deslocamento de calibração, uma vez que os instrumentos analisados foram previamente calibrados em laboratório.

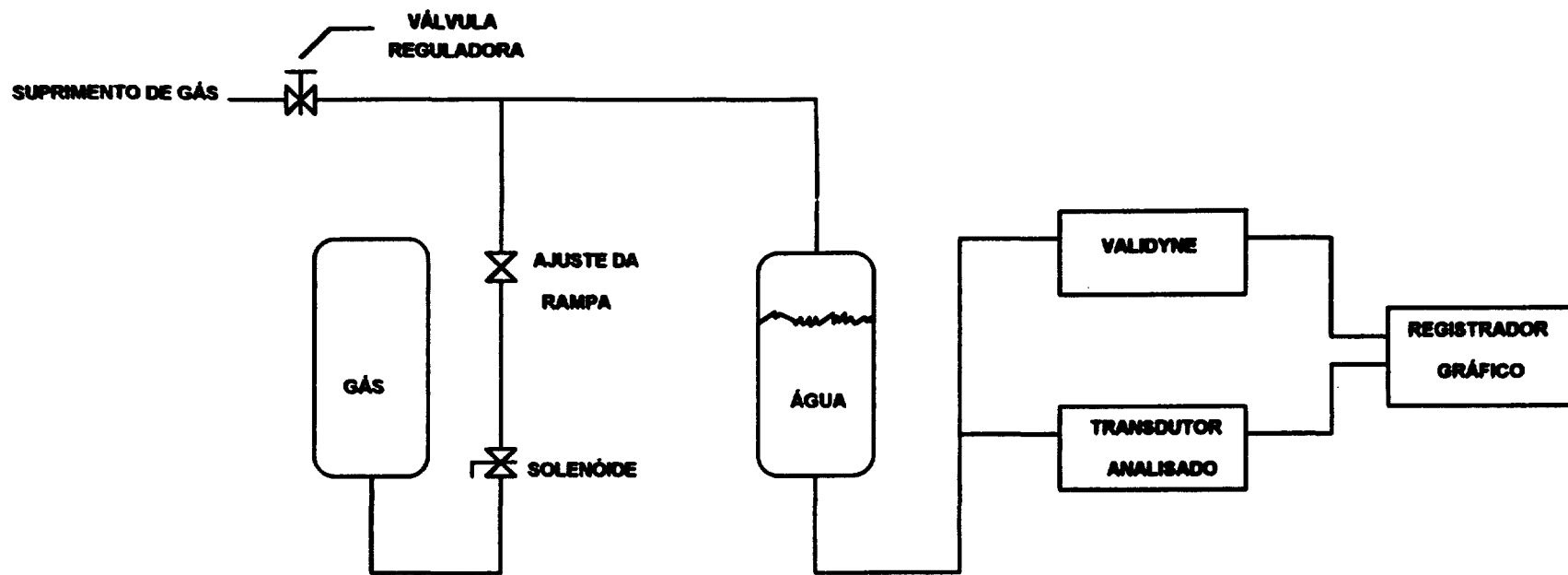


Figura 8.1. Arranjo Experimental

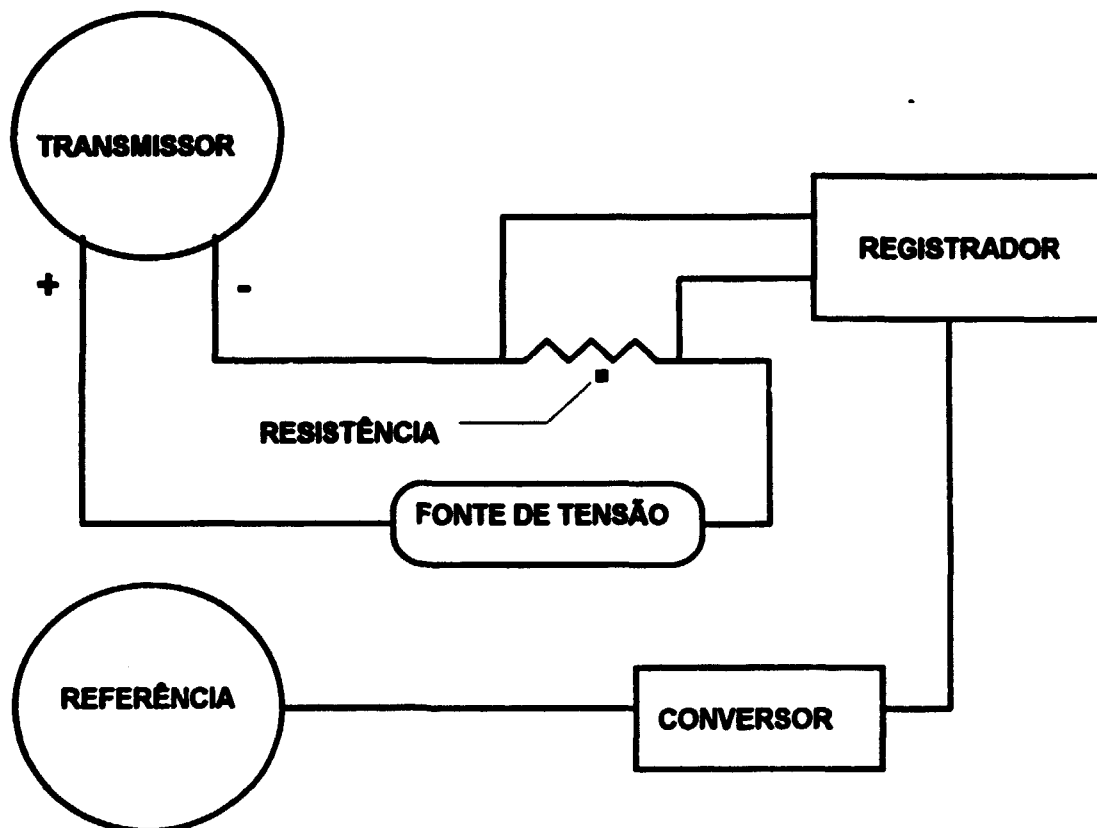


Figura 8.2. Arranjo Experimental

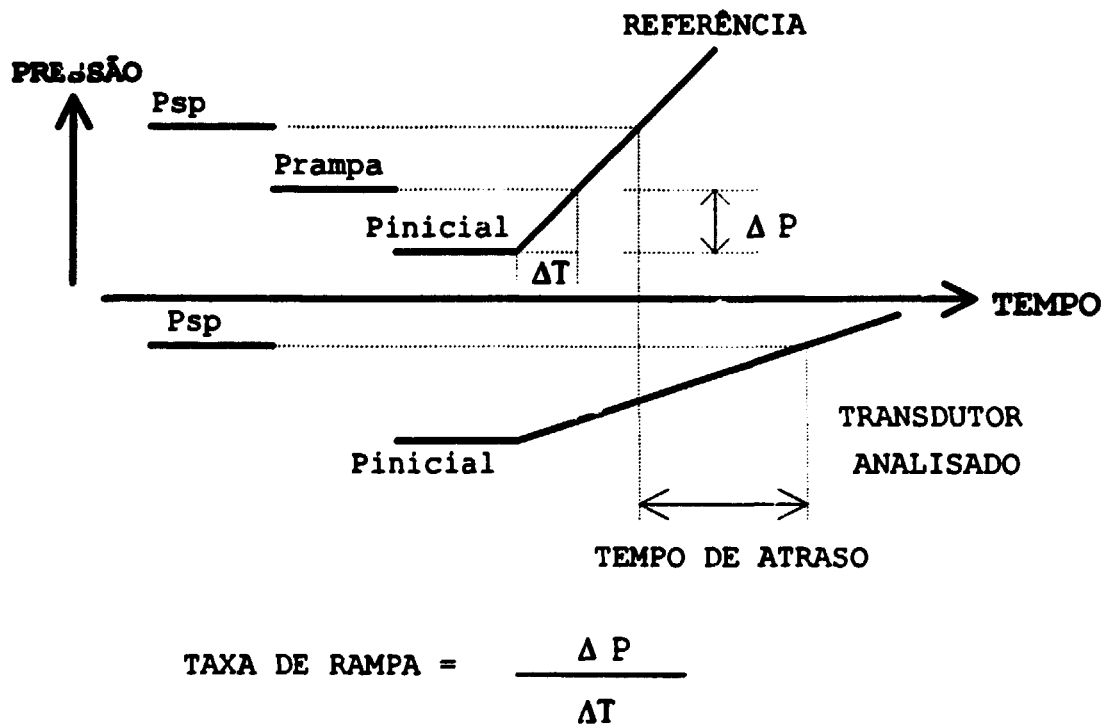


Figura 8.3. Determinação dos Parâmetros de Pressão

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após a realização dos testes envolvendo onze transdutores analisados, os seguintes pontos merecem destaque:

I) somente o da Eckardt apresentou tempos de atraso que dependem da taxa de rampa aplicada. Esta dependência da resposta do Eckardt é devida ao alto valor do coeficiente de damping do instrumento. Como o potenciômetro de ajuste vem lacrado de fábrica, não nos foi possível acessá-lo. Entretanto, os testes realizados com este instrumento demonstraram que ao se fixar a inclinação da rampa de pressão aplicada, os resultados do tempo de atraso se mantiveram com boa repetibilidade, o mesmo se sucedendo com sua resposta para transientes na forma de degrau positivo e negativo de pressão.

II) Os três transdutores modelo LD300 da Smar (#1, #2 e #3), quando submetidos a transientes do tipo rampa e degrau de pressão (positivos e negativos) apresentaram um grande intervalo de tempo entre o instante de início do transiente (detectado pelo transdutor de referência) e o instante em que

os mesmos reagiram ao transiente. A existência deste de tempo mostra que o transdutor requer um intervalo de tempo para processar as informações, ou seja, um "tempo morto". Outro transmissor da Smar (modelo LD200) com a mesma faixa de pressão, não apresentou tal comportamento, o que nos leva concluir que é o sistema eletrônico dos instrumentos LD300 o responsável pela existência deste "tempo morto". As Figuras 9.1 e 9.2 mostram transientes do tipo rampa de pressão aplicados aos transdutores LD300 e LD 200, respectivamente. As Figuras 9.3 e 9.4 mostram a resposta dos transdutores, quando submetidos a transiente do tipo degrau positivo de pressão, e nas Figuras 9.5 e 9.6 são mostrados os resultados para degraus negativos de pressão.

III) O teste PI aplicado ao transdutor da Foxboro demonstrou ser um teste bastante simples e de boa repetibilidade. Entretanto a análise do resultado não é simples e requer muita cautela por parte do experimentador para encontrar o ponto correto de leitura do tempo de resposta.

IV) Os transientes do tipo degrau de pressão demonstraram que os transdutores analisados não necessariamente apresentam respostas dinâmicas semelhantes quando submetidos a degraus positivos e negativos, o que mostra que estes instrumentos não se comportam como sistemas lineares de primeira ordem, muito embora tenham apresentado boa repetibilidade.

V) Os testes envolvendo o pote de selagem demonstraram que este elemento contribui significativamente para o aumento do tempo de resposta do transdutor. No caso do tempo de atraso houve um aumento da ordem de 16 vezes quando se conectou o pote de selagem ao Barton, e no caso da constante de tempo, o aumento foi da ordem de 55 vezes. Entretanto, esta influência negativa do pote de selagem não pode ser evitada, pois como foi explicado, este elemento serve para proteger o instrumento contra contaminação radioativa, uma vez que isola o instrumento da água de processo do circuito primário.

VI) Os experimentos demonstraram que bôlhas de ar com pequenos comprimentos não são suficientes para influenciar negativamente o tempo de resposta, e que somente a partir de alguns centímetros é que houve realmente uma degradação do tempo de atraso. Deve-se ressaltar que os efeitos de bôlhas de ar na linha de pressão de instrumentos de pressão é tão menor quanto maior for a pressão a que o transdutor for submetido, ocorrendo na verdade indicações erráticas de pressão, fazendo com que se perca a confiabilidade nas leituras do instrumento.

VII) Em 8 dos 11 casos (~70%), o valor da constante de tempo é maior do que o valor do tempo de atraso, o que demonstra que a constante de tempo fornece valores conservativos do tempo de resposta dos instrumentos e serve como um parâmetro para avaliar o comportamento dinâmico do instrumento.

VIII) A Tabela 9.1 mostra uma comparação entre os resultados obtidos através do teste em rampa, degrau positivo de pressão e PI (quando aplicável). Nesta tabela verificamos que não há relação entre os resultados obtidos, embora em alguns casos os resultados tenham sido relativamente próximos uns dos outros, para o mesmo instrumento, entretanto, o que se verificou foi uma boa repetibilidade de cada teste, o que demonstra que a escolha de um ou outro teste pode ser feita para a monitoração da degradação do tempo de resposta de transdutores de pressão, porém não sem antes aplicar o teste em rampa de pressão de acordo com o transiente postulado no relatório de análise de acidentes da instalação.

RECOMENDAÇÕES

Em relação à metodologia, uma conclusão importante é a de que a medida direta do tempo de resposta de transdutores de pressão é um meio simples e eficiente de verificar o seu comportamento dinâmico em laboratório, e desta forma obter a "assinatura" do transdutor, a exemplo do que faz a análise de ruído. Entretanto, devido às complexidades envolvidas para a sua aplicação em uma central nuclear (riscos de contaminação radioativa, exposição à radiação), o método de análise de ruído deverá ser estudado com maior profundidade até que os seus resultados sejam compatíveis com os resultados obtidos através do método direto, e desta forma aplicá-lo na determinação do

tempo de resposta de transdutores de pressão, e na sua monitoração.

Para isso, é necessário um programa intenso de estudos da análise de ruído para medida de tempo de resposta, que deve envolver testes em laboratório e testes na própria instalação nuclear, para que os resultados obtidos por este método possam ser correlacionados entre si e com os resultados obtidos por outros métodos. Outro ponto importante sobre a análise de ruído, é que este programa de testes poderá capacitar o método de maneira a fornecer informações que não sejam somente determinísticas, ou seja, apenas quantitativas, mas sim que possam fornecer informações qualitativas capazes de identificar as causas que geraram a degradação do tempo de resposta. Com este "background" será possível, inclusive utilizar a análise de ruído para agir de maneira preditiva.

Enquanto estes estudos não forem realizados o método direto continuará sendo o único método aceito pelas autoridades licenciadoras para a medida do tempo de resposta dos transdutores de pressão ligados ao sistema de proteção de uma central nuclear.

Com relação ao gerador hidráulico, devemos ressaltar que durante o programa experimental, o gerador hidráulico de rampa apresentou problemas de vazamento na válvula solenóide e em algumas válvulas agulha. Foram dois os problemas apresentados pela válvula solenóide:

Tabela 9.1. Comparação Entre os Tempos de Resposta Obtidos

FABRICANTE	TEMPO DE ATRASSO (ms)	CONSTANTE DE TEMPO (ms)	TESTE PI
ITT/BARTON	160	1640 ± 20	NÃO APLICÁVEL
FISHER	40	20 ± 20	NÃO APLICÁVEL
SCHLUMBERGER	23	160 ± 5	NÃO APLICÁVEL
SMAR	80	67 ± 5	NÃO APLICÁVEL
SMAR #1	873	986 ± 10	NÃO APLICÁVEL
SMAR #2	864	967 ± 5	NÃO APLICÁVEL
SMAR #3	917	983 ± 10	NÃO APLICÁVEL
ENGISTREL	125	115 ± 5	NÃO APLICÁVEL
TRANSMITEL	160	190 ± 5	NÃO APLICÁVEL
ECKARDT	340	430 ± 5	NÃO APLICÁVEL
FOXBORO	280	700 ± 5	580 ± 5

- o primeiro problema foi a perda de estanqueidade da válvula, que provocava a passagem de ar do cilindro acumulador para o cilindro hidráulico, mesmo com a válvula fechada. Este problema foi resolvido ao trocar o anel de selagem fabricado em polietileno rígido por um anel de borracha mais macia. Este problema provocava uma pequena vazão de ar do cilindro acumulador para o cilindro hidráulico, causando um transiente indesejado, antes do início do teste.

- o segundo problema foi a perda de estanqueidade em algumas válvulas agulha, que foi resolvido utilizando uma pasta especial denominada "carborundum" para desbastar a sede das válvulas. Esta falta de estanqueidade, dependendo da função da válvula, causava um aumento na pressão no interior do gerador, não permitindo o início do teste a partir de uma situação de estado estacionário de pressão.

Por ser uma válvula de apenas uma via, a mesma oferece estanqueidade para apenas um sentido de fluxo (do cilindro acumulador para o cilindro hidráulico). Como em alguns casos os transientes de projeto de uma central nuclear exigem testes que envolvam rampas decrescentes de pressão, recomenda-se que esta válvula seja trocada por outra, de duas vias, ou seja, que permita escoamento no sentido do cilindro acumulador para o cilindro hidráulico e vice-versa. A nova válvula deverá permitir pressões de trabalho da ordem de 15 MPa, tipicamente encontrada em centrais nucleares. Para isto as conexões do gerador deverão ser alteradas e deverá ser feito um teste

hidrostático para verificar a capacidade do gerador de trabalhar a altas pressões.

Para experiências futuras, deverão ser utilizados sistemas de aquisição de dados para acelerar a obtenção dos sinais de resposta dos transdutores e através de programas computacionais acoplados a este sistema, tornar a análise dos resultados mais confiável, uma vez que desta forma ela se torna menos dependente da habilidade e acuidade visual do experimentador.

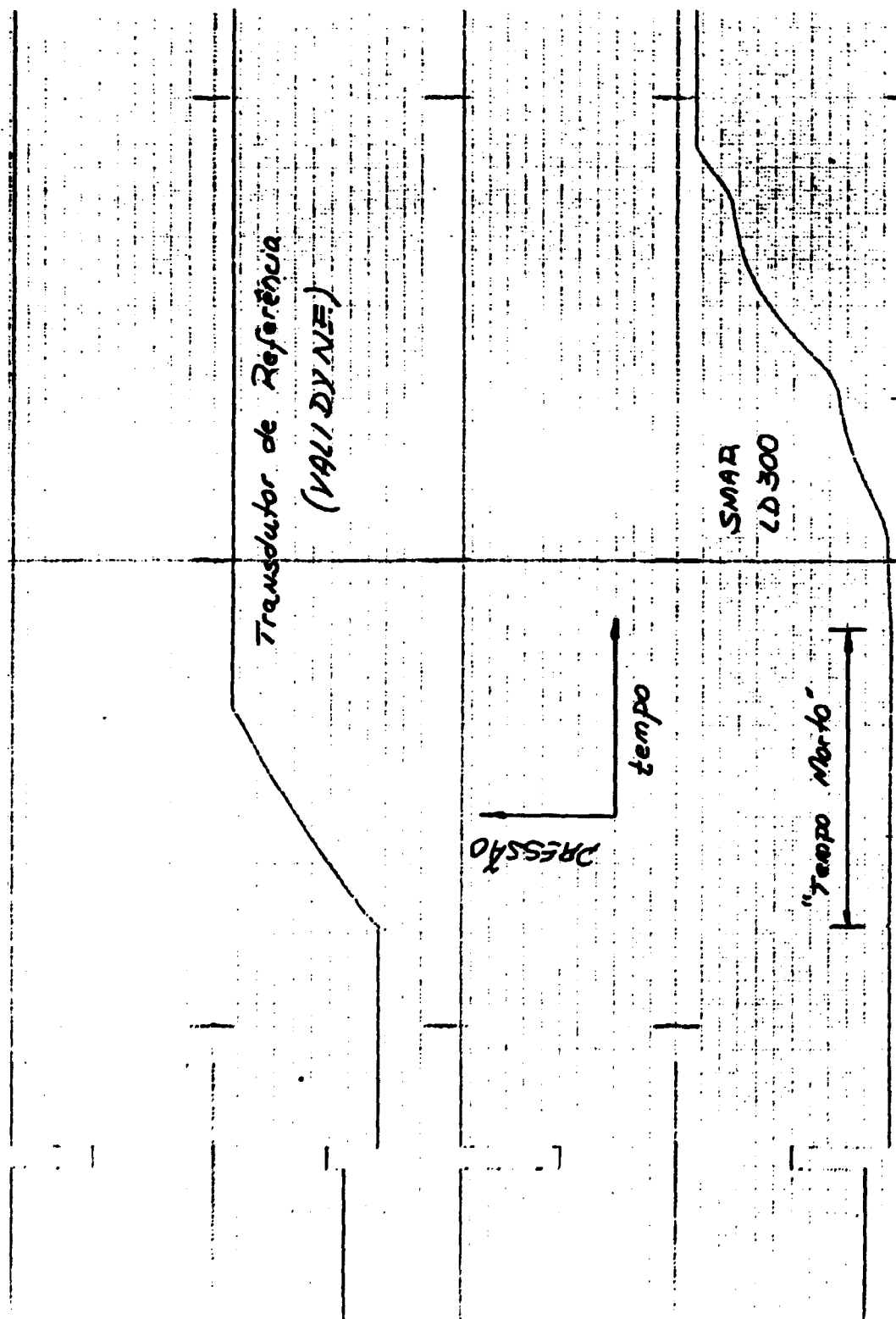


Figura 9.1. Transdutor LD300 Com "tempo Morto" - Transiente do Tipo Rampa de Pressão

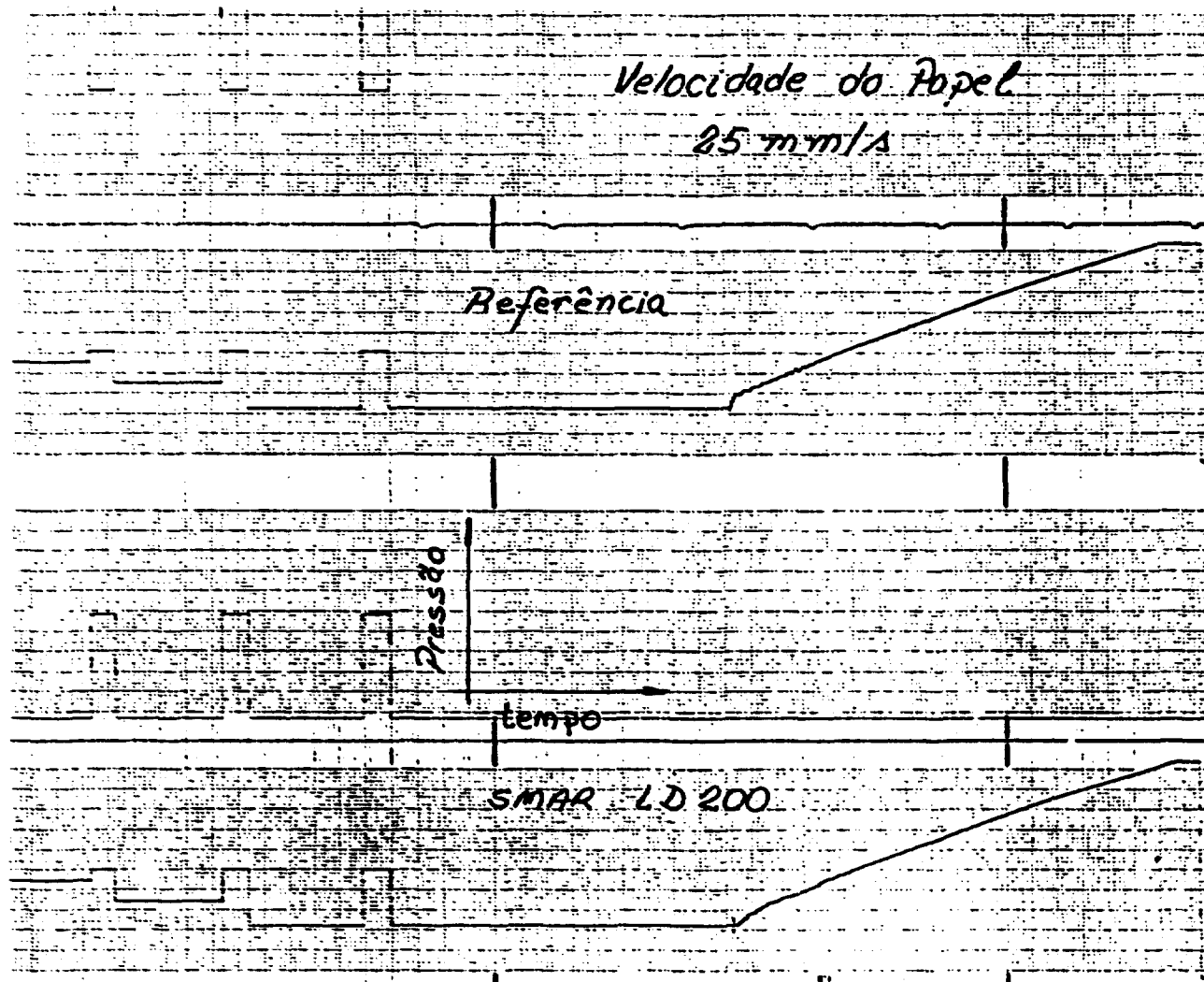


Figura 9.2. Transdutor LD200 Com Resposta Normal - Transiente do Tipo Rampa de Pressão

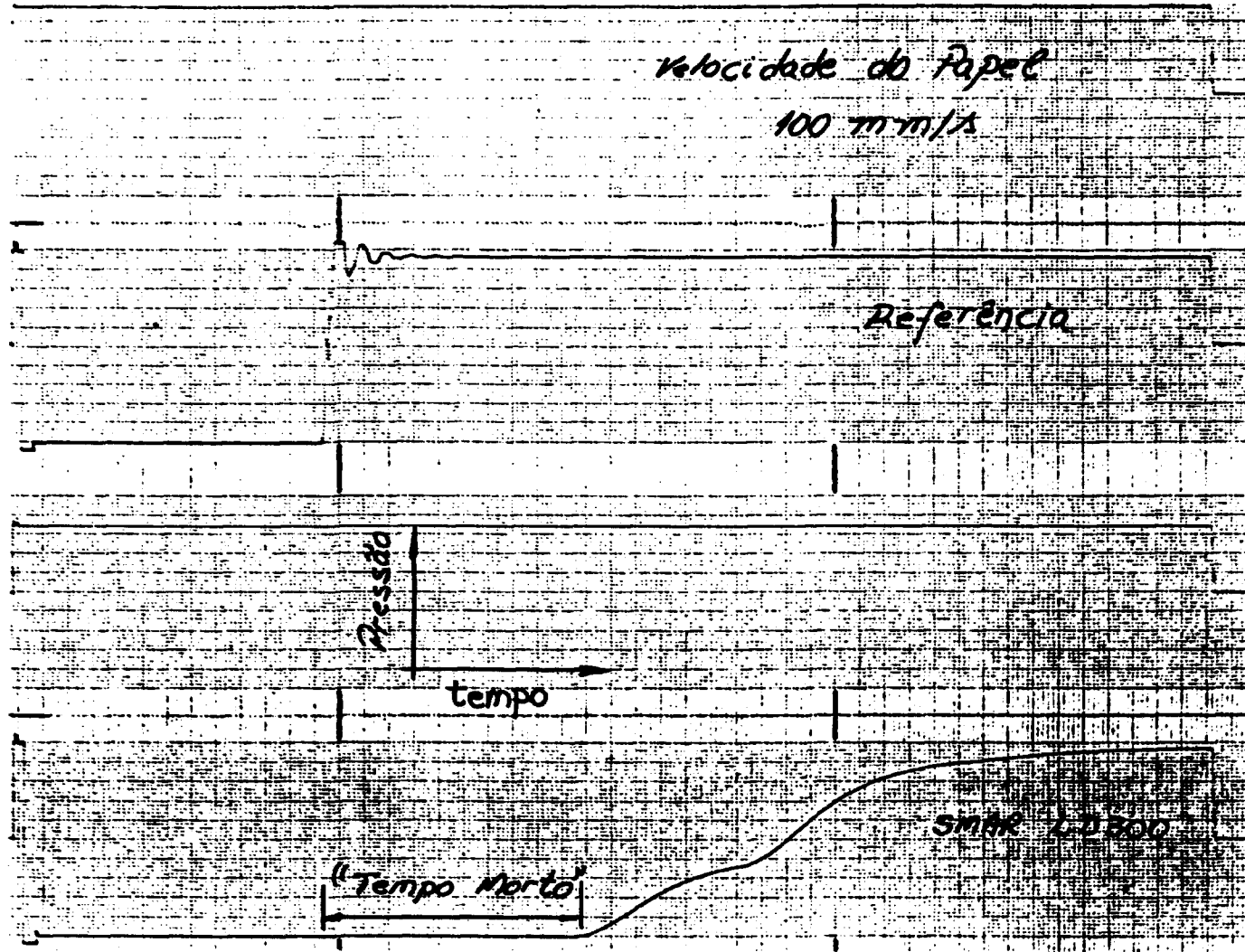


Figura 9.3. Transdutor LD300 Com "tempo Morto" - Transiente do Tipo Degrau (Positivo) de Pressão

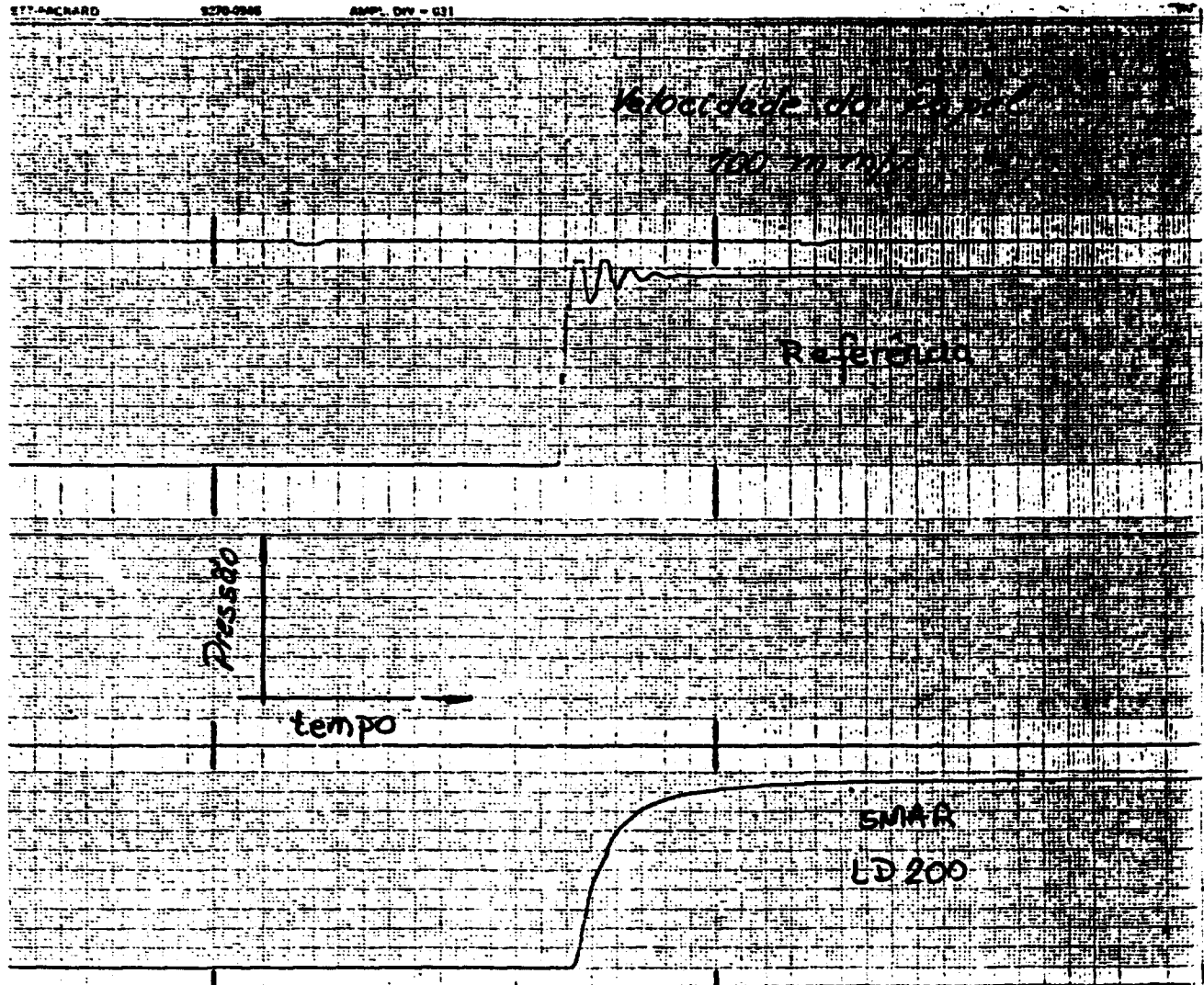


Figura 9.4. Transdutor LD200 Com Resposta Normal - Transiente do Tipo Degrau (Positivo) de Pressão

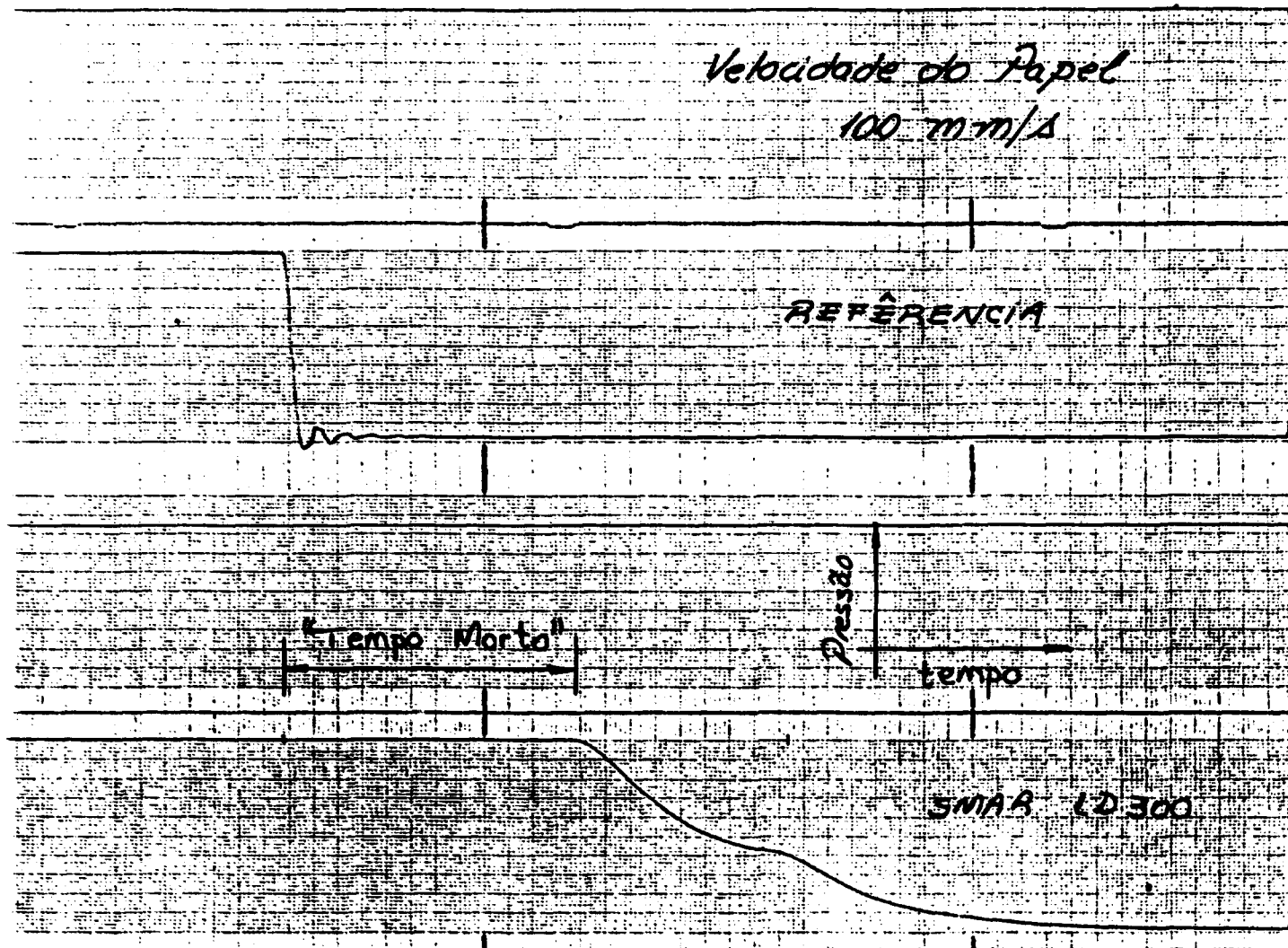


Figura 9.5. Transdutor LD300 Com "tempo Morto" - Transiente do Tipo Degrau (Negativo) de Pressão

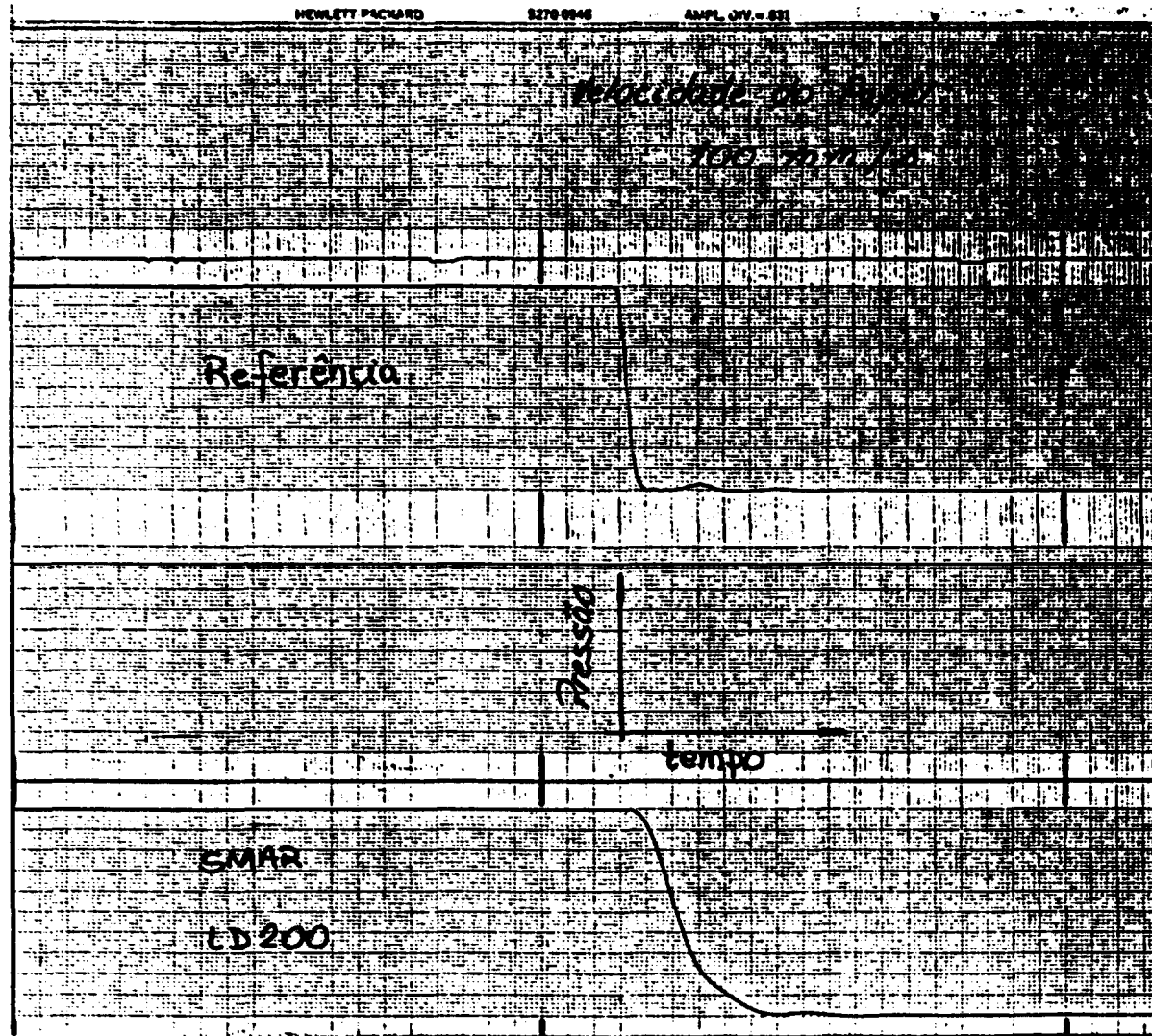


Figura 9.6. Transdutor LD200 Com Resposta Normal - Transiente do Tipo Degrau (Negativo) de Pressão

10 REFERÊNCIAS

- (1) NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Assessment of Class 1E Pressure Transmitters Response When Subjected to Harsh Environment.* Albuquerque, NM, Mar. 1985. (NUREG/CR-3863).
- (2) NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Effect of Aging on Response Time of Nuclear Plant Pressure Sensors.* Washington, DC, Jun. 1989. (NUREG/CR-5383).
- (3) NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Periodic Testing of Electric Power and Protection Systems.* New York, N.Y, Nov. 1977. (NUREG 1.118)
- (4) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *Standard Criteria for the Periodic Testing of Nuclear Power Generating Station Safety Systems.* New York, N.Y, 1975 (IEEE STD.338).
- (5) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *Criteria for Protection Systems for Nuclear Power Generating Stations.* New York, N.Y, 1971. (IEEE STD.279).

- (6) D'AZZO, J.J. & HOUPIS, C.H. Solution of Differential Equations. In: D'AZZO, J.J. & HOUPIS, *Linear Control Systems Analysis and Design Conventional and Modern*. Kogakusha, McGraw-Hill, 1975. p.66-84.
- (7) OGATA, K. Análise de Resposta Transitória. In: OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Rio de Janeiro, PHB do Brasil, 1982, p.247-283.
- (8) NUCLEAR REGULATORY COMMISSION SERVICE. *Failure of Rosemount Models 1153 & 1154 Transmitters*. April 21, 1989. (NRC N89-42).
- (9) HASHEMIAN, H.M & PETERSEN, K.M.; Response Time Testing of Pressure Transmitters in Nuclear Power Plants. (Trabalho apresentado ao First Annual ISA/EPRI Joint Controls and Automation Conference, St. Petersburg Beach, Florida, June 1991).
- (10) NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Long Term Performance and Aging Characteristics of Nuclear Plant Pressure Transmitters*. Washington, D.C. 1993. (NUREG/CR-5851).

- (11) FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. *Final Safety Analysis Report. Central Nuclear "Almirante Álvaro Alberto" Unit I, Chapter 15: Accident Analysis. Rio de Janeiro, 1992. (Rev. 23)*
- (12) CAIN, D.G & FOSTER, G. C. *A Practical Means For Pressure Transducer Response Verification. Nucl. Technol., 36: 275-284, 1977.*
- (13) SOARES, A.J., *Study and Dynamic Modeling Of a Pressure Transducer That is Based on the Principle of Force Balance. Tennessee, 1982. (Tese de doutoramento, Universidade do Tennessee).*
- (14) ANALYSIS AND MEASUREMENT. *Proposal Services for In-Situ Response Time Testing of RTDs and Pressure Transmitters At ANGRA Unit I. Knoxville, TN. July 9, 1993. (Rev.0)*
- (15) FILHO, E.O.A., LOPES, P.R. DE L., CARNEIRO, A.L.G. & DA SILVA, A.A., *Aplicações da Técnica de Modelos Auto-Regressivos no Cálculo de Tempo de Resposta de Sensores em Instalações Nucleares. (Trabalho apresentado ao IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termoidráulica (ENFIR) Caxambú, Out.93).*

- (16) VAN WYLEN, & G.J., SONTAG, R.E. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. São Paulo, Edgard Blücher. 1976.
- (17) VENNARD, J.K. & STREET, R.L. *Elementos de Mecânica dos Fluidos*. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1978.
- (18) De Nevers, N.; *Fluid Mechanics*. Utah, Addison-Wesley, 1970.

11 ANEXO

11.1 ESCOAMENTO ADIABÁTICO REVERSÍVEL UNIDIMENSIONAL EM REGIME PERMANENTE ATRAVÉS DE UM BOCAL

Um bocal é um dispositivo no qual a energia cinética de um fluido é elevada segundo um processo adiabático. Esta elevação envolve uma diminuição na pressão, que é conseguida por uma variação apropriada da área de escoamento. Um difusor é um dispositivo que possui a função inversa, isto é, elevar a pressão pela desaceleração do fluido.

Utilizando a primeira lei da termodinâmica, temos para um processo em regime permanente o volume de controle da Figura 11.1, que mostra um bocal convergente-divergente, onde a seção reta de menor área é chamada de garganta.

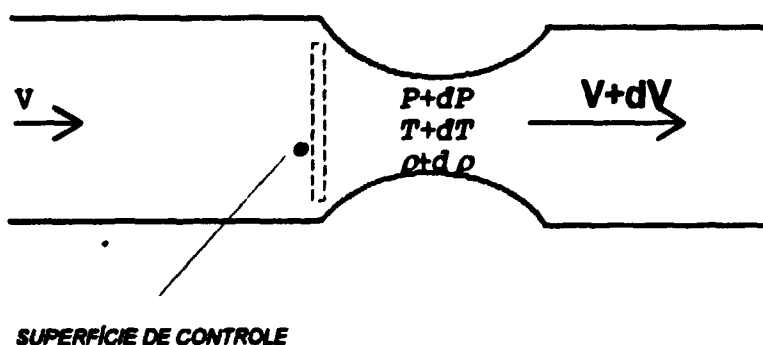


Figura 11.1. Escoamento Adiabático Reversível Unidimensional em Regime Permanente Através de um Bocal.

onde,

V é a velocidade de escoamento;

T é a temperatura do gás;

ρ é a densidade do gás.

Para o volume de controle mostrado na figura anterior, podemos escrever as seguintes relações:

Primeira lei:

$$dh + \frac{VdV}{g_c} = 0 \quad (11.1)$$

sendo: dh entalpia específica;

g_c constante que relaciona força, massa, comprimento e tempo (conversão de unidades).

Relação de propriedades:

$$Tds = dh - \frac{dP}{\rho} = 0 \quad (11.2)$$

Equação da continuidade:

$$\rho AV = \dot{m} = \text{constante}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (11.3)$$

sendo \dot{m} o fluxo de massa.

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dA}{A} = -\frac{dV}{V} = 0 \quad (11.4)$$

Combinando as equações 11.2 e 11.3 temos

$$dh = \frac{dP}{\rho} = \frac{-VdV}{g_c}$$

ou,

$$dV = -\frac{g_c}{\rho V} dP$$

que substituindo na equação 11.3 fica

$$\frac{dA}{A} = \left(-\frac{d\rho}{\rho} - \frac{dV}{V} \right) = -\frac{d\rho}{\rho} \left(\frac{dP}{d\rho} \right) + \frac{g_c}{\rho V^2} dP$$

$$= \frac{-dP \left(\frac{d\rho}{dP} - \frac{g_c}{V^2} \right)}{\rho} = \frac{dP}{\rho} \left(-\frac{1}{\left(\frac{dP}{d\rho} \right)} + \frac{g_c}{V^2} \right)$$

Como o escoamento é isentrópico,

$$\frac{dP}{d\rho} = \frac{c^2}{g_c} = \frac{V^2}{M^2 g_c}$$

e portanto,

$$\frac{dA}{A} = \frac{dP}{\rho \left(\frac{V^2}{g_c} \right)} (1 - M^2) \quad (11.4)$$

O termo "M" que aparece na equação 11.4 é o número de Mach, que é definido como a razão entre a velocidade real "V" e a velocidade sônica "c".

Esta é uma equação bastante significativa, pois através dela podemos concluir a cerca da forma adequada dos bocais e difusores:

Para um bocal $dP < 0$. Portanto,

para um bocal subsônico $M < 1$, $dA < 0$ e o bocal é convergente.

para um bocal supersônico $M > 1$, $dA > 0$ e o bocal é divergente.

Para um difusor $dP > 0$. Portanto,

para um difusor subsônico $M < 1$, $dA > 0$ e o difusor é divergente.

para um difusor supersônico $M > 1$, $dA < 0$ e o difusor é convergente.

Quando $M = 1$, $dA = 0$, o que significa que a velocidade sônica pode ser encontrada na garganta de um bocal ou difusor.

Retornando à primeira lei da termodinâmica para um escoamento isentrópico de um gás perfeito, podemos relacionar a entalpia, a entalpia de estagnação e a energia cinética, lembrando que o estado de estagnação isentrópico, e as propriedades a ele associadas, é o estado que um fluido teria se sofresse uma desaceleração adiabática reversível até a

velocidade nua. O índice utilizado para indicar este estado será o "0", como o utilizado por Van Wylen (6).

$$h + \frac{V^2}{2g_c} = h_0 \quad (11.5)$$

Para um gás perfeito, com calor específico constante, a equação anterior pode ser escrita na forma:

$$V^2 = 2g_c c_{p0} (T_0 - T) = 2g_c \frac{kRT}{k-1} \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right), \quad (11.6)$$

onde:

c_{p0} é o calor específico na pressão de estagnação;

k é a relação entre os calores específicos C_p/C_v ;

R é a constante do gás.

como

$$c^2 = kg_c RT$$

substituindo na equação 11.6 resulta:

$$V^2 = \frac{2c^2}{k-1} \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right)$$

$$\frac{V^2}{c^2} = M^2 = \frac{2}{k-1} \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right)$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{(k-1)}{2} M^2 \quad (11.7)$$

Para um processo isentrópico,

$$\left[\frac{T_0}{T} \right]^{k/(k-1)} = \frac{P_0}{P}, \quad \left[\frac{T_0}{T} \right]^{1/(k-1)} = \frac{\rho_0}{\rho}$$

Portanto,

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{k/(k-1)} \quad (11.8)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{(k-1)}{2} M^2 \right)^{1/(k-1)} \quad (11.9)$$

Os valores de P/P_0 , ρ/ρ_0 e T/T_0 , são dados em função de M da tabela de gases, e cada tabela para um dado valor de " k ".

As condições na garganta do bocal podem ser encontradas, fazendo $M=1$ na garganta. As propriedades na garganta são indicadas por um asterisco "*".

Desta forma:

$$\frac{T^*}{T} = \frac{2}{k+1} \quad (11.10)$$

$$\frac{P^*}{P} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (11.11)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (11.12)$$

As propriedades na garganta de um bocal quando $M=1$, são conhecidas como **pressão crítica**, **temperatura crítica** e **massa específica crítica**, e as relações dadas pela equações 11.10, 11.11 e 11.12 são chamadas de **relação crítica de temperatura**, **de pressão** e **de massa específica**.

Para a descarga por unidade de área, \dot{m}/A , em um bocal, consideraremos a equação da continuidade:

$$\frac{\dot{m}}{A} = \rho V = \frac{PV}{RT} \sqrt{\frac{kg_c T_0}{kg_c T_0}} = \frac{PV}{\sqrt{kg_c RT}} \sqrt{\frac{g_c k}{R}} \sqrt{\frac{T_0}{T}} \sqrt{\frac{1}{T_0}}$$

que resulta:

$$\frac{PM}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{kg_c}{R}} \sqrt{1 + M^2 \frac{k-1}{2}} \quad (11.13)$$

Substituindo a equação 11.8 na equação 11.12, a descarga por unidade de área pode ser expressa em termos da pressão de estagnação, temperatura de estagnação, número de Mach e propriedades dos gases.

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{kg_c}{R}} \frac{1}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{(k+1)/2(k-1)}} \quad (11.14)$$

Na garganta, $M=1$ e portanto, a descarga por unidade de área na garganta, \dot{m}/A , pode ser encontrada, fazendo $M=1$ na equação 11.14,

$$\frac{m}{A} = \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{kg_c}{R}} \frac{1}{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{(k+1)/2(k-1)}} \quad (11.15)$$

A relação das áreas A/A^* pode ser obtida pela divisão da equação 11.14 pela 11.15,

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\left(\frac{2}{k+1}\right) \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right) \right]^{(k+1)/2(k-1)} \quad (11.16)$$

A relação das áreas A/A^* é a relação entre a área do ponto onde o número de Mach é "M" pela área da garganta, e os valores de A/A^* em função de Mach são dados em tabelas para gases.

A equação 11.2 estabelece a condição necessária para o estabelecimento de vazão crítica (sônica) na garganta da válvula V-05, e vazão de equalização subsônica na saída, funcionando portanto como um difusor. Utilizando $k = 1,4$ para o ar obtemos:

$$\frac{P^*}{P} \cong 0,528 \quad (11.17)$$

que mostra que a relação entre as pressões dos cilindros A_2 e A_1 deve ser de aproximadamente de dois para um (2:1), necessariamente. Nesta condição a saída da válvula V-05 está bloqueada, passando por ela a maior vazão possível de ser alcançada.

12 ANEXO

12.1 TRANSFORMADA INVERSA DE LAPLACE PARA UM SISTEMA LINEAR DE ORDEM "M" COM UM SINAL DE ENTRADA EM FORMA DE RAMPA

Conforme demonstrado na Seção 2.4, o sinal de saída de um sistema linear de ordem "m" com um sinal de entrada em forma de rampa, no domínio de Laplace, é dado por:

$$O(s) = \frac{(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_m)} \frac{1}{s^2} \quad (12.1)$$

Utilizando a técnica de resíduos para cálculo da transformada inversa de Laplace, obtém-se:

$$O(t) = \sum_{\text{polos}} \left(\text{resíduos de } O(s)e^{st} \right) \quad (12.2)$$

sendo os resíduos dados por:

$$R_i = \text{resíduos de } O(s) / i = \frac{1}{(n-1)!} \left\{ \frac{d^{n-1}}{ds^{n-1}} \left[(s-s_i)^n O(s) e^{st} \right] \right\}_{s=-p_i} \quad (12.3)$$

onde P_i são os polos, e "n" é o número de ordem do polo.

Substituindo a equação 12.1 na equação 12.3, o resultado em 12.2, obtemos que:

$$O(t) = \sum_{\text{polos}} \frac{1}{(n-1)!} \left\{ \frac{d^{n-1}}{ds^{n-1}} \left[(s-s_i)^n \frac{(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_m)} e^{st} \right] \right\}_{s=-p_i} \quad (12.4)$$

Definindo

$$\frac{N(s)}{D(s)} = G(s) = \frac{(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_m)} \quad (12.5)$$

$O(t)$ pode ser escrita como

$$\begin{aligned}
O(t) &= (s+p_1) \frac{N(s) e^{st}}{D(s) s^2} \Big|_{s=-p_1} + (s+p_2) \frac{N(s) e^{st}}{D(s) s^2} \Big|_{s=-p_2} + \\
&\dots + (s+p_m) \frac{N(s) e^{st}}{D(s) s^2} \Big|_{s=-p_m} + \left[\frac{1}{(s+z_1)} \frac{N(s)}{D(s)} e^{st} \right. \\
&+ \frac{1}{(s+z_2)} \frac{N(s)}{D(s)} e^{st} + \dots + \frac{1}{(s+z_n)} \frac{N(s)}{D(s)} e^{st} - \frac{1}{(s+p_1)} \frac{N(s)}{D(s)} e^{st} \\
&\left. - \frac{1}{(s+p_2)} \frac{N(s)}{D(s)} e^{st} - \dots - \frac{1}{(s+p_m)} \frac{N(s)}{D(s)} e^{st} + \frac{N(s)}{D(s)} t e^{st} \right] \Big|_{s=0}
\end{aligned}$$

(12.6)

substituindo s pelos respectivos polos $(-p_1, -p_2, \dots, -p_m, 0)$, temos:

$$\begin{aligned}
O(t) &= K_1 e^{-p_1 t} + K_2 e^{-p_2 t} + \dots + K_m e^{-p_m t} + \frac{z_1 z_2 \dots z_n}{p_1 p_2 \dots p_m} - \\
&\left(\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} + \dots + \frac{1}{p_m} - \frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} - \dots - \frac{1}{z_n} \right) \frac{z_1 z_2 \dots z_n}{p_1 p_2 \dots p_m}
\end{aligned}$$

(12.7)

ou seja:

$$O(t) = K_1 e^{-p_1 t} + K_2 e^{-p_2 t} + \dots + K_m e^{-p_m t} + K_{(m+1)}(t - \theta) \quad (12.8)$$

onde

$$K_{(m+1)} = \frac{z_1 z_2 \dots z_n}{p_1 p_2 \dots p_m}$$

e

$$\theta = \left(\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} + \dots + \frac{1}{p_m} - \frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} - \dots - \frac{1}{z_n} \right)$$