

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

SERGIO RICARDO PEREIRA PERILLO
ADALBERTO JOSÉ SOARES
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES IPEN/CNEN-SP
Travessa R, 400 - Cid. Universitária - CEP 05422-970-Pinheiros
São Paulo-Brasil

RESUMO

Neste trabalho apresentamos os resultados do tempo de resposta de transdutores de pressão, obtidos através do método de medida direta. Para estas medidas foi utilizado um gerador hidráulico de rampa, que permite gerar transientes de pressão dos tipos degrau e rampa. Estes transientes são sentidos simultaneamente pelo transdutor analisado e pelo transdutor de referência. Foram analisados 11 (onze) transdutores de pressão na faixa entre 0 e 400 KPa.

INTRODUÇÃO

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

Devido ao ambiente hostil em que muitos transdutores estão localizados, os seus componentes podem sofrer alterações com o tempo. 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.

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" [1], a "U.S. Nuclear Regulatory Commission" estabeleceu uma regulamentação para a determinação do tempo de resposta de sensores, e a partir de então, foram adotados procedimentos de testes baseados em normas [2,3], 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. Segundo as normas, os testes devem ser feitos "in-situ", ou seja, com o transdutor instalado no local de operação. 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.

FUNDAMENTOS SOBRE O 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.

No caso de se utilizar um transiente em forma de degrau, determina-se um parâmetro denominado **constante de tempo**. A constante de tempo é definida como o tempo necessário para que o sinal de saída do instrumento alcance 63.2% do valor do degrau. 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.

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. Este tipo de teste pode ser aplicado a qualquer tipo de sistema linear.

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:

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

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 1, obtemos:

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

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

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{\sigma}{\sigma s + 1} \quad (3)$$

Tomando a transformada inversa de Laplace da equação 3, obtemos

$$C(t) = 1 - e^{-t/\sigma} \quad (t \geq 0) \quad (4)$$

Note-se que para o tempo $(t) = \sigma$, a equação 4 nos dará como resultado o valor que define a constante de tempo:

$$C(t = \sigma) = 0.632 \quad (5)$$

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:

$$C(s) = \left(\frac{1}{\sigma s + 1} \right) \left(\frac{1}{s^2} \right) \quad (6)$$

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

$$C(s) = \frac{1}{s^2} - \frac{\sigma}{s} + \frac{\sigma^2}{\sigma s + 1} \quad (7)$$

Tomando a transformada inversa de Laplace da equação 7, obtém-se:

$$C(t) = t - \sigma + \sigma e^{-t/\sigma} \quad (t \geq 0) \quad (8)$$

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

$$C(t \gg \sigma) = (t - \sigma) \quad (9)$$

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, quando submetidos a um transiente em forma de rampa e após um certo tempo do início do transiente, um sinal semelhante ao de entrada, defasado de um valor " τ ", que independe da inclinação da rampa. 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. Portanto, para a aplicação do teste em rampa recomenda-se que sejam aplicadas duas rampas distintas: uma baseada no transiente mais lento (suave) e a outra baseada no transiente mais rápido 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.

TRANSDUTORES UTILIZADOS PARA MEDIDA DE PRESSÃO EM CENTRAIS NUCLEARES

Em geral os transdutores de pressão correspondem a cerca de 80% dos sensores ligados ao sistema de proteção de uma central nuclear. Utilizados para medida de pressão, vazão e nível, eles são vistos como 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 ou tubo de 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 o 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.

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.

Teste em Rampa. O teste em rampa consiste em se aplicar ao transdutor sob investigação e simultaneamente a outro transdutor, considerado como referência, um sinal de pressão em forma de rampa, e comparar as respostas de saída dos dois instrumentos. Este teste permite determinar o "tempo de atraso" do instrumento analisado.

O método foi desenvolvido na década de 70 pela Nuclear Services Corporation, empresa contratada na época pela Electric Power Research Institute, e utiliza um equipamento conhecido como "Gerador Hidráulico de Rampa [4].

Atualmente todos os testes feitos para se determinar o tempo de resposta de sensores de pressão em centrais nucleares utilizam um equipamento 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.

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. O gerador é o mesmo 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.

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 só é aplicável a transdutores que utilizam o princípio de balanço de forças, tendo sido validado apenas para transdutores da **FOXBORO COMPANY**.

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 devidas a turbulências ocasionadas pela passagem da água de processo, transferência de calor do núcleo do reator, rotação da bomba principal, e outros fenômenos naturais ao processo. Estas flutuações, comumente denominadas de ruído, são extraídas do sinal de saída do transdutor removendo-se a componente DC do sinal e amplificando a componente AC. A 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 faz-se uma transformação de Fourier do sinal e obtém-se a densidade espectral de potência, (do inglês "Power Spectral Density" - PSD). 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), 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.

DESCRIÇÃO DO GERADOR HIDRÁULICO DE RAMPA

Conforme visto na Figura 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 posicionada na saída do acumulador serve para controlar e ajustar a inclinação da rampa, e uma válvula solenóide em série a esta válvula serve para dar início ao transiente.

Com a válvula solenóide fechada e a válvula agulha ajustada, estabelece-se a pressão no cilindro (A_1) até a pressão inicial, menor que a pressão no cilindro A_2 . Uma vez ajustada a rampa através da válvula agulha, abre-se a válvula solenóide para dar início ao transiente, que é sentido simultaneamente pelo transdutor analisado e pelo transdutor de referência, ambos conectados na saída do cilindro A_1 .

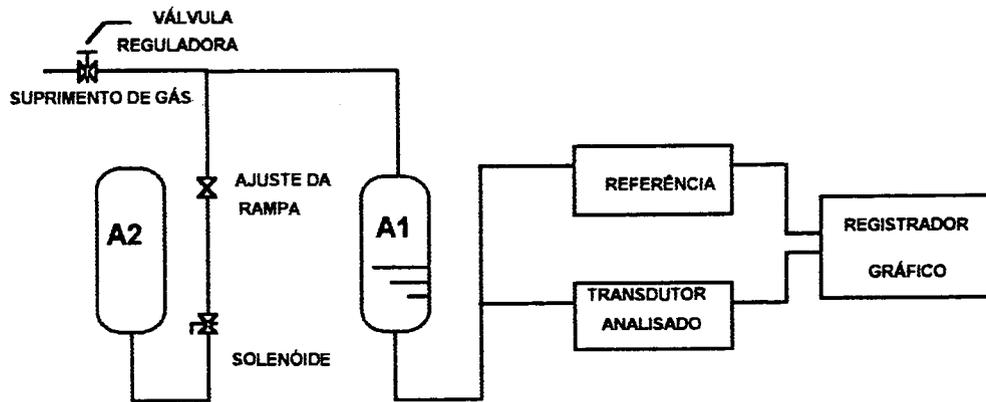


Figura 1. Arranjo Experimental

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 quando se estabelece uma diferença de pressão (em valores absolutos) entre o cilindro acumulador e o cilindro hidráulico na razão de 2 para 1, o que propicia a formação de escoamento sônico na válvula V-05, posicionada na saída do cilindro A₂.

Na prática, para que a relação seja mantida durante todo o transiente, Cain [4] concluiu que a seguinte relação empírica deve ser observada:

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

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, nível de pressão na qual deseja-se medir o tempo de atraso.

A equação 10 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 durante todo o transiente.

É importante salientar que as pressões calculadas pela equação 10 estão em pressão absoluta.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

A Tabela 1 mostra as principais características dos transdutores utilizados nos testes.

Como indicado na Figura 2, antes de se aplicar os transientes do tipo rampa, foram feitos os registros dos valores correspondentes às pressões de set-point " P_{sp} " (nível escolhido para determinação do tempo de atraso), pressão de rampa " P_{rampa} " (para o cálculo da taxa de subida de rampa) e pressão inicial no cilindro hidráulico " $P_{inicial}$ ". Os registros foram feitos para o transdutor analisado e para o transdutor de referência.

Tabela 1 Principais Características dos Transdutores Analisados.

FABRICANTE	MODELO	FAIXA DE PRESSÃO (KPa)	TIPO DE SENSOR
ITT/BARTON	764	0-392	STRAIN GAGE
FISHER	1151DP7E22LMMB	0-1000	CÉLULA CAPACITIVA
SCHLUMBERGER	PDH3200/030/72	0-400	CÉLULA CAPACITIVA
SMAR	LD200	0-400	CÉLULA CAPACITIVA
SMAR	LD300	0-400	CÉLULA CAPACITIVA
SMAR	LD300	0-400	CÉLULA CAPACITIVA
SMAR	LD300	0-400	CÉLULA CAPACITIVA
ENGISTREL	PD4BL228UNCC	0-25	CÉLULA CAPACITIVA
TRANSMITEL	B1151DP4E22MLB3	0-25	CÉLULA CAPACITIVA
ECKARDT	5153931	0-25	CÉLULA CAPACITIVA
FOXBORO	E13DM	0-10	BALANÇO DE FORÇAS

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para verificar a influência da taxa de elevação da rampa de pressão no tempo de atraso, foram aplicados na entrada dos transdutores de referência e do transdutor analisado sinais com diferentes taxas de elevação de pressão, os resultados estão na Tabela 2, onde as taxas de rampa e os tempos de atraso listados em cada linha se correspondem respectivamente.

Alguns 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 3 mostra os resultados obtidos para a constante de tempo utilizando degraus positivos e negativos.

Tendo em vista que alguns transdutores são instalados utilizando-se potes de selagem, resolvemos aproveitar para avaliar a influência do mesmo no tempo de resposta. O teste foi feito medindo-se o tempo de resposta

do transdutor da ITT/Barton com e sem o pote de selagem. Os resultados obtidos estão na Tabela 4.

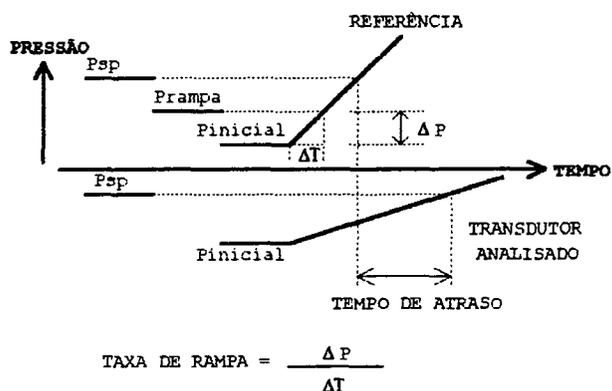


Figura 2. Determinação dos Parâmetros de Pressão

Tabela 2. Tempo de Atraso dos Transdutores Analisados

FABRICANTE	TAXA DE SUBIDA DA RAMPA (KPa/s)	TEMPO DE ATRASO (ms)
ITT/BARTON	6;28	160;160 (±40)
FISHER	10;21;26;32;40	40;40;4040;40 (±20)
SCHLUMBERGER	47;119;157	20;20;30 (±20)
SMAR	64;96	80;80 (±20)
SMAR	44;68;139	900;860;860 (±20)
SMAR	34;74;90;104;313	860;840;860;890;870 (±40)
SMAR	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 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	986 ± 10	980 ± 10
SMAR	967 ± 10	1030 ± 10
SMAR	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 4. 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

CONCLUSÕES

Os transdutores apresentaram tempo de atraso independente da taxa de rampa aplicada, de acordo com a teoria de controle de

sistemas, com exceção do transdutor da Eckardt, devido ao seu alto nível de ajuste de amortecimento eletrônico, que tornou o seu tempo de resposta fortemente dependente da rampa aplicada.

Em virtude de não haverem sido desenvolvidas correlações entre as diferentes técnicas, sugere-se que seja mantida a regra de medida direta como determinação e "baseline", e outra técnica para monitorar a degradação do tempo de resposta.

Todos os testes demonstraram boa repetibilidade, para cada condição de ensaio;

O método apresentou ser bastante simples e prático de ser aplicado em laboratório, embora a sua aplicação em uma central nuclear envolva dificuldades de implementação.

REFERÊNCIAS

[1] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Periodic Testing of Electric Power and Protection Systems**. New York, N.Y., Nov. 1977. (NUREG 1.118).

[2] 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).

[3] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Criteria for Protection Systems for Nuclear Power Generating Stations**. New York, N.Y., 1971. (IEEE STD.279).

[4] CAIN, D.G & FOSTER, G. C. **A Practical Means For Pressure Transducer Response Verification**. *Nucl. Technol.*, 36: 275-284, 1977.

ABSTRACT

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

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 (IE Class and Conventional) are presented.