

RFREQ: PROGRAMA PARA CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO

Fernando Jorge Rodrigues Neves

Cristiano Viana Serra Villa

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900 - Brasília, D.F., Brasil. E-mail: fernando@enm.unb.br

Resumo

A calibração dinâmica de transdutores de pressão apresenta muitos desafios para o metrologista. Um deles é o processamento adequado dos sinais adquiridos experimentalmente para que se possa estimar a Função de Resposta em Frequência -FRF- do transdutor sob calibração. Neste sentido, este trabalho apresenta uma descrição dos programas PreRF e RFreq. O RFreq permite obter uma estimativa da FRF do transdutor. É possível obter a estimativa para os dois tipos de calibração possíveis: calibração absoluta (quando não se usa um transdutor de referência) e a calibração comparativa (quando é usado um transdutor de referência). O RFreq é um programa de fácil uso e apresenta bons resultados. O PreRF é um programa de pré-processamento dos sinais obtidos experimentalmente, para que possam ser analisados pelo RFreq.

Palavras-chave: Calibração dinâmica, Resposta em Frequência, transdutores de pressão.

1. INTRODUÇÃO

A calibração dinâmica de transdutores de pressão é uma tarefa complexa. Da seleção de equipamentos à apresentação dos resultados, os desafios a serem vencidos são muitos e não existe consenso científico a respeito do assunto, e que fundamente uma norma. Da parte dos fabricantes, a única característica dinâmica dos transdutores fornecida é a frequência natural.

Considerando apenas os geradores de pressão não periódicos, a calibração dinâmica de transdutores de pressão em baixas frequências pode ser feita com o equipamento denominado de Dispositivo de Abertura Rápida - DAR (o DAR costuma ter uma frequência máxima de calibração de 200 Hz). Para altas frequências, o equipamento a ser utilizado na calibração é o Tubo de Choque. Com ele, a frequência máxima pode atingir 1 MHz.

Ao se usar o tubo de choque para a calibração dinâmica de um transdutor de pressão é usual admitir a hipótese de que o sinal que excita o transdutor pode ser adequadamente descrito por um degrau de Heaviside multiplicado por uma janela retangular de duração apropriada. O conhecimento que se tem atualmente do comportamento da dinâmica dos gases no tubo de choque (ou a sua modelagem numérica) não é o bastante para descrever de forma suficientemente precisa o sinal de pressão medido por um transdutor ideal quando atingido pela onda gerada no tubo de choque. Deve-se notar que, não sendo disponíveis padrões que permitam a calibração do comportamento metrológico do tubo de choque (nem, obviamente, um sensor de pressão com comportamento ideal), só o conhecimento teórico (ou obtido por simulação numérica) do

comportamento da pressão no dispositivo poderia fornecer o sinal de referência necessário para obtenção da Função de Resposta em Frequência - FRF. Sabe-se, no entanto, que a onda de choque aplica no transdutor uma variação de pressão extremamente rápida. Estes argumentos justificam a hipótese apresentada.

Esta modalidade de calibração, em que se supõe que o sinal de excitação do transdutor é um degrau de pressão teórico, é chamada de calibração absoluta (Damion, 1994). Neste tipo de calibração, surge um problema ao se fazer a estimativa da função de resposta em frequência do transdutor. Os sinais de excitação e de resposta não possuem Transformada de Fourier (no sentido da convergência da integral de Fourier). Assim, a razão entre os sinais de resposta e de excitação do transdutor no domínio da frequência não converge para a FRF (Função de Resposta em Frequência) do transdutor. Com isso, os métodos tradicionais para estimar a FRF, que são baseados na referida razão, não funcionam neste caso.

Outro método de calibração dinâmica é denominado de calibração comparativa (Damion, 1994). Ele é utilizado para calibração de transdutores de trabalho, com resposta dinâmica lenta, quando comparados com um transdutor “padrão de referência”. Nessa modalidade de calibração, o transdutor de referência é submetido ao mesmo sinal de pressão que o transdutor sob calibração. Neste caso, a estimativa da Função de Resposta em Frequência do transdutor pode ser feita através de uma razão entre espectros de potência obtidos a partir dos sinais de resposta dos dois transdutores.

O programa RFreq foi desenvolvido para estimar a FRF na calibração dinâmica de transdutores de pressão. O RFreq é adequado tanto para o método comparativo como para o absoluto, e calcula, além da função de resposta em frequência, a incerteza de medição segundo metodologia baseada na norma ISO TAG4/WG3 (1995). Para a calibração comparativa, calcula ainda seqüências de coerência, espectro de potência de ruído e razão sinal / ruído para os modelos apresentados por Villa (2000).

2. PRERF: PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS

A figura 1 exemplifica uma montagem experimental para calibração dinâmica dos transdutores de pressão. O tubo de choque consiste em um tubo de seção transversal constante, constituído de uma câmara de alta pressão e de outra de baixa pressão separadas por um diafragma. Nesta câmara, são instalados dois transdutores de pressão, um de referência e um sob calibração. Os transdutores piezoelétricos estão ligados aos amplificadores de carga correspondentes, que por sua vez são conectados a um dispositivo de aquisição de dados, como um microcomputador equipado com uma placa de aquisição de sinais e o *software* adequado.

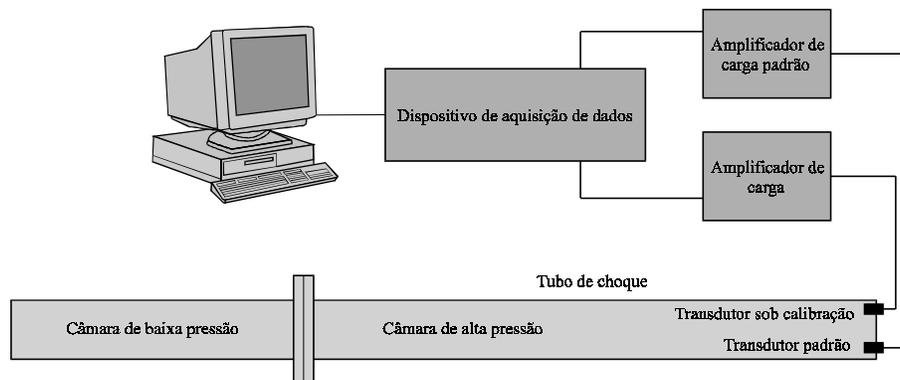


Figura 1. Exemplo de montagem experimental para calibração dinâmica de transdutores de pressão

Normalmente, um sinal de pressão adquirido tem a forma apresentada na figura 2. Nesta figura, a primeira região contém amostras adicionadas ao sinal pelo mecanismo de *buffer* e *triggering* do sistema de aquisição de dados. A segunda região contém as amostras que representam o sinal de pressão causado pela onda de choque entre os instantes da primeira e da segunda reflexão no fundo do tubo de choque. A terceira região representa as amostras do sinal de pressão após a segunda reflexão da onda de choque no fundo do tubo.

Na calibração absoluta, a região 1 deve ser eliminada. Assim, o sinal sofre uma translação de eixos de modo a ter sua primeira amostra significativa na origem dos eixos. Ao se proceder desta maneira, faz-se com que o instante inicial da análise seja o instante no qual o transdutor começa a detectar a variação de pressão, e que a pressão no tubo induzido antes da passagem da onda de choque seja nula. Esse procedimento se faz necessário por que a implementação dos métodos numéricos utilizados no RFreq supõe que o transdutor começa a ser excitado no instante zero da análise. Também é necessária a eliminação da região 3 para que o sinal resultante tenha a característica de um sinal de resposta de um sistema linear invariante no tempo (isto é, um sistema linear descrito por uma equação diferencial ordinária com coeficientes constantes) a um degrau de Heaviside.

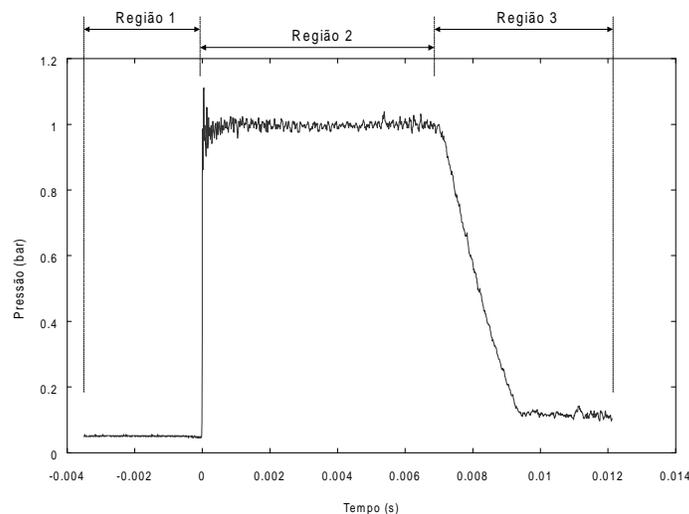


Figura 2. Sinal de pressão no fundo do tubo de choque dividido em três regiões

Na calibração comparativa, não existe a necessidade da eliminação das regiões 1 e 3. Tanto o sinal do transdutor sob calibração, quanto o do transdutor de referência, possuem estas regiões. Sua preservação melhora o procedimento de estimativa da Função de Resposta em Frequência. Com mais informação disponível, melhor a estimativa.

Com o objetivo de fazer as operações descritas nos parágrafos anteriores, foi elaborado o programa PreRF. Este programa foi inteiramente desenvolvido em *Delphi 3.0 Standard*, e sua tela principal é mostrada na figura 3 com as características funcionais mais importantes numeradas para posterior explicação.

Uma característica importante do PreRF é o Depósito de Sinais, que é uma estrutura de dados criada com a intenção de agrupar diversos sinais. Nesta condição, é mais fácil de se trabalhar computacionalmente quando se busca calcular o sinal médio e a sua incerteza, ao contrário do que ocorre quando se trabalha com vários arquivos separados.

A região 1 da figura 2, que representa as amostras originárias do *buffer* do sistema de aquisição de dados, é removida pela seleção adequada do “Ponto Inicial” (campo número 2 na figura 3). Esta seleção é feita atuando-se numa barra deslizante, e a movimentação desta barra faz

com que no gráfico “Sinal Original” (campo número 9 na figura 3) uma retícula vermelha se movimenta, indicando qual será a amostra inicial do sinal pré-processado. Acima da barra de rolagem do “Ponto Inicial”, são indicados o índice da amostra do sinal original (n), o valor do tempo ($t[n]$) e o valor da amostra ($y[n]$) correspondentes a esta índice. No campo número 3 da figura 3, chamada de “Ponto Final”, há a opção de se fazer a escolha da amostra final do sinal pré-processado. Esta escolha é indicada por uma retícula azul no gráfico “Sinal Original”, e os valores característicos da amostra são mostrados acima da barra de rolagem, tal como no “Ponto Inicial”.

Após a seleção das amostras inicial e final, tem-se o “Sinal Pré-Processado” (campo número 10 na figura 3). Este novo sinal é delimitado pelo “Ponto Inicial” e pelo “Ponto Final” selecionados no sinal original. Ele sofre uma translação de eixos de modo a ter sua primeira amostra na origem, e é mostrado no gráfico “Sinal Pré-Processado”. O quadro “Informações do Sinal” (campo número 4 na figura 3) apresenta estas informações, além do número de amostras do sinal pré-processado.

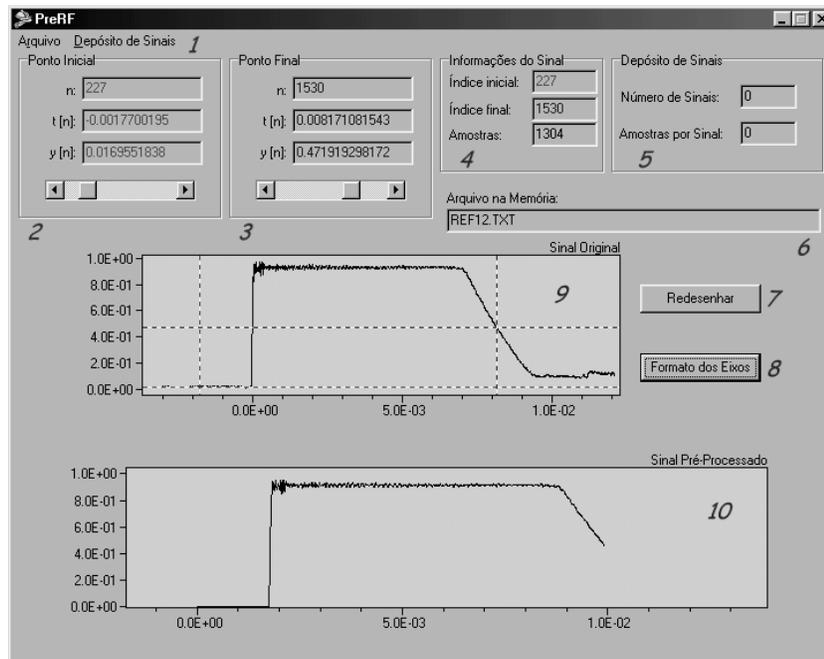


Figura 3. Tela principal do PreRF

As funcionalidades restantes do PreRF são explicadas mais detalhadamente no trabalho de Villa (2000).

3. APRESENTAÇÃO DO RFREQ

O programa RFreq tem como objetivo estimar a Função de Resposta em Frequência de um transdutor de pressão a partir de seus sinais de excitação e de resposta. Mesmo tendo esse objetivo, ele pode ser utilizado para estimar a Função de Resposta em Frequência de outros tipos de sensores.

O módulo principal do RFreq foi programado em *Delphi 3.0 Standard* e é responsável pela manipulação de arquivos de dados, interface com o usuário e gerenciamento dos módulos. Os demais módulos são escritos em Fortran 90 (*Digital Visual Fortran 6.1*) e são responsáveis pela

implementação dos métodos numéricos. Eles foram compilados como uma aplicação de console *Win32*, e otimizados para microprocessadores *Pentium Pro*.

O modelo dinâmico utilizado para a calibração é mostrado na figura 4, onde o sinal $s[n]$ representa a variação de pressão causada pela reflexão da onda de choque no fundo da câmara de baixa pressão do tubo de choque. O transdutor de referência tem FRF H_1 e resposta ao sinal $s[n]$ dada por $x[n]$. O transdutor sob calibração tem FRF H_2 e resposta a $s[n]$ dada por $y[n]$. Os sinais $n_1[n]$ e $n_2[n]$ são componentes de ruído. Assume-se que os sinais $x[n]$ e $y[n]$, que são adquiridos experimentalmente, são componentes de processos estocásticos discretos estacionários, e que as FRF dos transdutores são desconhecidas.

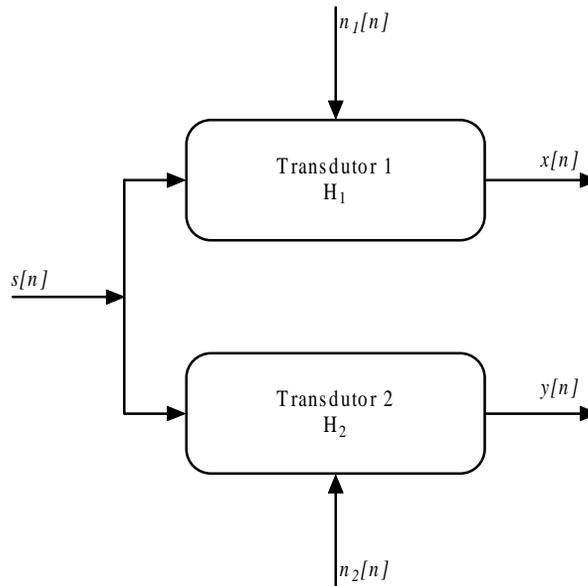


Figura 4. Modelo 1 entrada / 2 saídas utilizado no RFreq

A seleção do método numérico para a estimativa da FRF do transdutor sob calibração depende das equações governantes do modelo 1 entrada / 2 saídas, apresentadas por Villa (2000). No RFreq, os métodos numéricos para a calibração absoluta são o Método de Schechter e Wissler (Schechter & Wissler, 1959), Método da Derivação (Villa, 2000), Método de Laspe (Laspe, 1954) e Método da Decomposição em Sinc (Samulon, 1951). Estes métodos, denominados de métodos não convencionais, são apropriados para o cálculo da Função de Resposta em Frequência de um sistema linear invariante no tempo, a partir de sua resposta a um degrau de Heaviside. Para a calibração comparativa, são disponibilizados o Método de Wiener-Khintchine, o Método do Periodograma Modificado e o Método de Welch, apresentados por Proakis & Manolakis (1996). Nestes métodos, a partir do espectro de potência cruzado entre o sinal de resposta e o sinal de excitação de um sistema linear invariante no tempo e do espectro de potência do sinal de excitação, a FRF do sistema pode ser estimada. Estes métodos são chamados de métodos convencionais. No trabalho de Villa (2000), os métodos citados são explicados detalhadamente.

A tela principal do RFreq é mostrada na figura 4. Também aqui os campos foram numerados para permitir sua identificação. As partes mais destacadas da tela principal do RFreq são os canais 1 e 2. No canal 1, o usuário “carrega” o sinal que representa a excitação do transdutor de pressão. No canal 2, carrega-se o sinal de resposta do transdutor. No caso de uma calibração absoluta, o sinal do canal 1 é substituído por um degrau de Heaviside, sendo carregado pelo usuário no canal 2 o sinal pré-processado (ou um “Depósito de Sinais”) de resposta ao degrau de pressão.

Terminado este passo, o gráfico “Canal 1” mostrará um degrau de Heaviside multiplicado por uma janela retangular com o mesmo número de amostras existentes no canal 2.

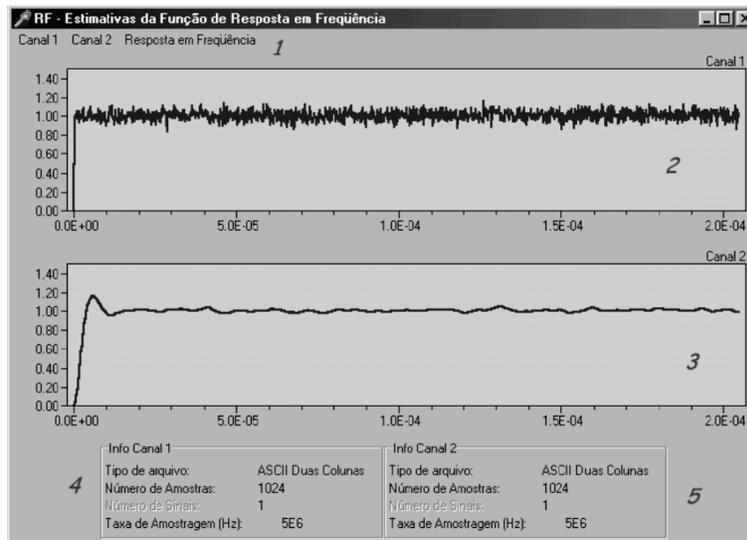


Figura 4. Tela principal do RFreq

As operações acima descritas são realizadas através dos menus “Canal 1” e “Canal 2” (campo número 1 na figura 4). O menu “Resposta em Frequência” (também no campo número 1 na figura 4) apresenta ao usuário quais são os métodos numéricos disponíveis em função do tipo de dado carregado nos canais 1 e 2.

Após a seleção do método numérico, o RFreq chamará o módulo correspondente e, após o cálculo, mostrará uma janela com os resultados obtidos. A figura 5 ilustra esta janela. De acordo com o método utilizado para o cálculo, os resultados mostrados podem variar. Maiores detalhes são apresentados por Villa (2000).

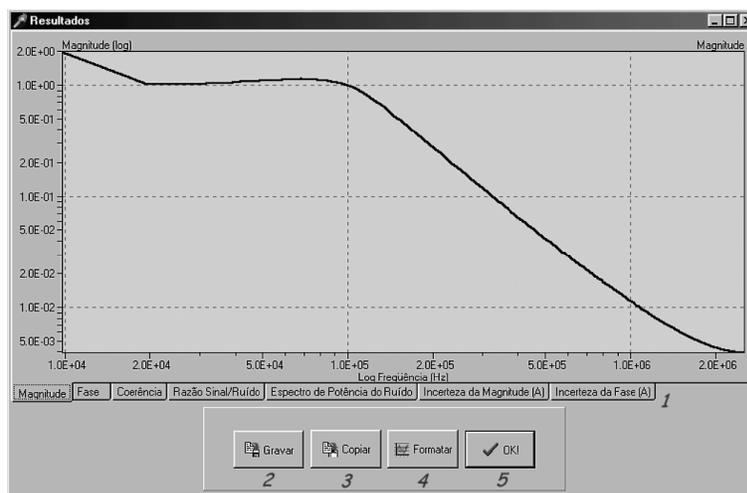


Figura 5. Tela de resultados do RFreq

Na tela de resultados, o usuário pode selecionar através das abas (campo número 1 na figura 5) o gráfico do resultado desejado. Para cada gráfico disponível, o usuário poderá alterar os parâmetros de visualização pressionando o botão “Formatar” (campo número 4 na figura 5).

Aparecerá então uma janela onde o usuário pode alterar os limites máximo e mínimo do eixo das frequências e esta alteração se refletirá em todos os gráficos. Para o gráfico selecionado, também é possível a alteração dos limites máximo e mínimo do eixo das ordenadas. As demais características e funcionalidades são descritas mais profundamente por Villa (2000).

4. ILUSTRAÇÃO DE USO DO RFREQ

Como exemplo de uso do RFreq, o programa foi utilizado com dados oriundos do Relatório Técnico de Atividades de Intercomparação Laboratorial UnB-ENSAM, de Vianna (1998), o que permite verificar se o RFreq tem um desempenho satisfatório quando comparado ao EDYCAP, programa utilizado na ENSAM (*École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers* - Paris - França) para estimar a Função de Resposta em Frequência dos transdutores piezoelétricos de pressão.

Os sinais de resposta do transdutor disponíveis da intercomparação são os obtidos com o tubo de choque TC-02, do Laboratório de Metrologia Dinâmica - UnB. Os sinais são o resultado de um experimento com a instrumentação tal como a mostrada na figura 1, sem o transdutor de referência. Como não foi utilizado um transdutor de referência, considera-se que a excitação do transdutor sob calibração é um degrau de pressão teórico. Desta forma, a Função de Resposta em Frequência do transdutor é estimada por meio dos métodos não convencionais. O trabalho de Vianna (1998) apresenta maiores detalhes quanto a procedimentos e equipamentos utilizados nos experimentos.

Para a ilustração do uso do RFreq, será considerada a situação em que foi utilizado como diafragma do tubo de choque um filme de acetato de celulose de coloração amarela. Após o pré-processamento dos sinais no PreRF, carrega-se um degrau de Heaviside no canal 1 e o Depósito de Sinais no canal 2, como mostrado na figura 6 (a). Com a seleção do Método de Laspe, obtém-se uma tela de resultados como a mostrada na figura 6 (b).

A faixa de frequências obtida com o RFreq vai de 143Hz até 131kHz. Os resultados fornecidos pelo EDYCAP têm sua frequência no intervalo 200Hz - 10kHz. Assim, para que os resultados do RFreq possam ser comparados aos do EDYCAP, só serão consideradas as frequências até 10kHz.

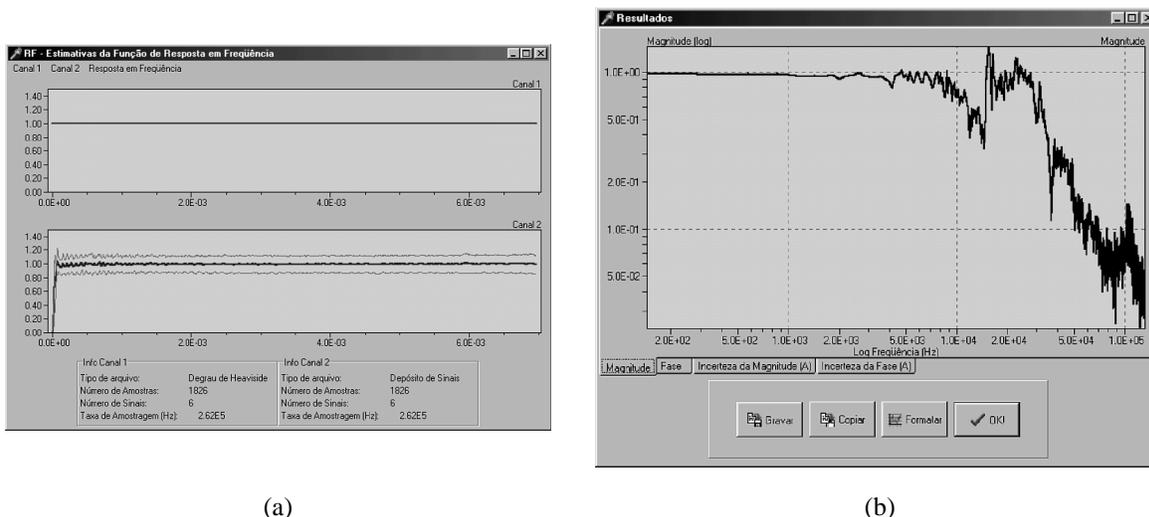


Figura 6. (a) Tela principal do RFreq, com um degrau de pressão teórico no canal 1 e a resposta média do transdutor de pressão (com um intervalo de confiança de 95%); (b) tela de resultados do RFreq mostrando a magnitude da Função de Resposta em Frequência.

As figuras 7 e 8 apresentam graficamente os resultados da comparação dos resultados obtidos pelos dois programas. Pode ser visto na figura 7 que há uma aproximação muito boa entre os resultados obtidos pelo RFreq e os do EDYCAP. Já quanto gráfico de fase, a figura 8 mostra que a curva obtida pelo EDYCAP tem uma alta taxa de oscilação, enquanto que a do RFreq é mais suave. Estes resultados são muito semelhantes aos obtidos pelos demais métodos não convencionais (Villa, 2000), o que permite constatar que os resultados dados por métodos diferentes convergem para um mesmo resultado. Villa (2000) ainda apresenta uma comparação entre as incertezas estimadas pelo RFreq e as que foram calculadas a partir dos resultados do EDYCAP.

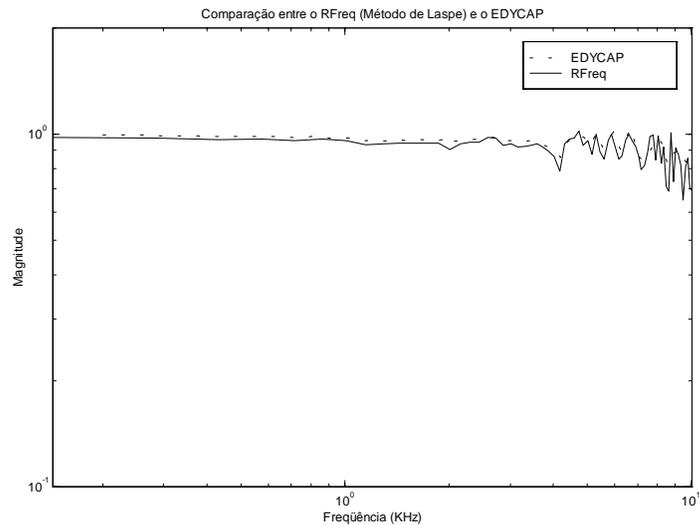


Figura 7. Comparação entre os resultados fornecidos pelo RFreq e pelo EDYCAP (magnitude da Função de Resposta em Frequência do transdutor).

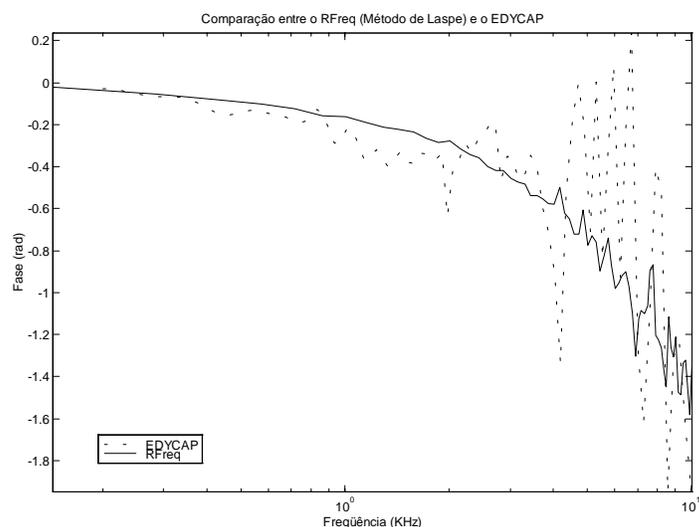


Figura 8. Comparação entre os resultados fornecidos pelo RFreq e pelo EDYCAP (fase da Função de Resposta em Frequência do transdutor).

5. CONCLUSÕES

O RFreq mostra-se um programa de fácil uso e que fornece bons resultados. A comparação com o EDYCAP demonstra que os resultados obtidos pelo RFreq são bons para o conjunto de dados analisado.

Com base nos resultados apresentados por Villa (2000), conclui-se que o RFreq pode ser utilizado como ferramenta em pesquisas que envolvam a calibração de transdutores de pressão para medições dinâmicas. Ele pode também ser usado em trabalhos comerciais, auxiliando na elaboração de laudos de calibração.

O RFreq também pode ser utilizado para a calibração dinâmica de outros tipos de transdutores, como por exemplo sensores de temperatura. O requisito é que o sinal de excitação do transdutor possa ser descrito “razoavelmente” por um degrau de Heaviside (com a aplicação da janela retangular de duração adequada), no caso de uma calibração absoluta. Para a utilização do RFreq em calibrações comparativas, a utilização dos métodos convencionais é feita partindo-se dos sinais de resposta do transdutor padrão e do transdutor de referência.

6. REFERÊNCIAS

- Damion, J. P., 1994, “Means of Dynamic Calibration for Pressure Transducers”, Metrologia, vol. 30, Paris, France, pp. 743-746.
- I.S.O. (International Organization for Standardization), 1995, “ISO TAG4/WG3 - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, Switzerland, 101pp.
- Laspe, C. G., 1964, “Determining Frequency Response from Transient Response”, Instruments & Control Systems, vol. 37, Broomall, Pennsylvania, United States of America, p. 125-128.
- Proakis, J. G., Manolakis, D. G., 1996, “Digital Signal Processing - Principles, Algorithms and Applications”, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., United States of America, 968p.
- Samulon, H. A., 1951, “Spectrum Analysis of Transient Response Curves”, Proceedings of the I.R.E., vol. 39, No. 2, New York, N.Y., United States of America, pp. 175-186.
- Schechter, R. S., Wissler, E. H., 1959, “Frequency Response from Step Input Response”, Industrial and Engineering Chemistry, vol. 51, [S.L.], pp. 945-948.
- Vianna, J. N. S., 1998, “Relatório Técnico de Intercomparação Laboratorial UnB-ENSAM”, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, D.F., Brasil, 31pp.
- Villa, C. V. S., 2000, “RFreq - *Software* para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, D.F., Brasil, 152pp.