

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA  
Área de Concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

***Detecção On-Line de Vazamentos em Vasos de Pressão  
Utilizando Sistemas Sônicos***

**Autor:** André Mauricio Pavan

**Orientador:** Profa. Dra. Sandra Lúcia da Cruz

**Co-orientador:** Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira

Dissertação de Mestrado apresentada à  
Faculdade de Engenharia Química, como  
parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do Título de Mestre em  
Engenharia Química.

Campinas-SP, Brasil  
Dezembro – 2005

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP**

P288d      Pavan, André Mauricio  
              Detecção on-line de vazamentos em vasos de pressão  
              utilizando sistemas sônicos / André Mauricio Pavan.--  
              Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientadores: Sandra Lúcia da Cruz, João Alexandre  
Ferreira da Rocha Pereira  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Vasos de pressão. 2. Detectores de vazamento. 3.  
Transdutores ultra-sônicos. I. Cruz, Sandra Lúcia. II.  
Pereira, João Alexandre Ferreira da Rocha. III.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Química. IV. Título.

Titulo em Inglês: On-line leak detection in pressure vessels using sonic systems

Palavras-chave em Inglês: Leak detection, Acoustic systems, Pressure vessels

Área de concentração: Sistema de Processos Químicos e Informática

Titulação: Mestre em Engenharia Química

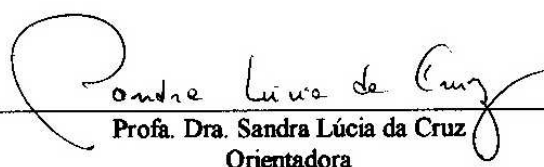
Banca examinadora: Profª. Dra. Sandra Lúcia da Cruz – Orientadora

Profª. Dra. Alice Maria Bastos Hubinger Tokarnia

Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

Data da defesa: 16/12/2005

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 16 de Dezembro de 2005 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:



---

Profa. Dra. Sandra Lúcia da Cruz  
Orientadora



---

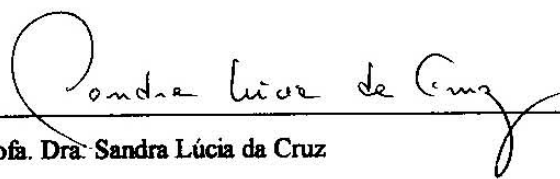
Profa. Dra. Alice Maria Bastos Hubinger Tokarnia  
Titular



---

Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva  
Titular

Esta versão corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida por André Mauricio Pavan e aprovada pela Comissão Julgadora em 16/12/05.



---

Profª. Dra. Sandra Lúcia da Cruz  
Orientadora

## ***RESUMO***

Vasos de pressão são equipamentos muito importantes numa indústria, sendo responsáveis por armazenar gases, líquidos e outros fluidos a altas pressões. Um pequeno vazamento nesses vasos pode ser muito perigoso, gerando poluição, explosão e perda financeira para a indústria. Por isso, é imprescindível uma rápida e eficaz detecção da ocorrência de qualquer vazamento.

Este trabalho descreve o desenvolvimento e teste de uma técnica de detecção de vazamentos de gás em vasos de pressão, baseada na análise da pressão no interior do vaso e do ruído sonoro gerado pelo vazamento.

Na montagem experimental utilizou-se um vaso de pressão com capacidade 34,5 litros, operando com ar. A pressão no interior do vaso variou de 1 a 7 kgf/cm<sup>2</sup>. Vazamentos de diversas magnitudes foram simulados através de um orifício, instalado lateralmente no vaso, cujo diâmetro variou de 0,1 a 4,0 mm. Vazamentos foram detectados quando o vaso de pressão operava em batelada e também quando havia alimentação contínua de ar para o vaso.

Para a detecção de vazamentos foi utilizado um microfone e um programa, em linguagem C, que faz a aquisição *on-line*, através de uma placa ADA, dos sinais provenientes de um transdutor de pressão conectado ao vaso e do microfone instalado no interior do vaso. O circuito elétrico que compatibiliza o sinal proveniente do microfone com aquele compreendido pela placa ADA foi desenvolvido no laboratório e apresenta duas etapas. Na primeira o sinal alternado é amplificado e na segunda o sinal passa por filtros passa banda de 1kHz, 5kHz e 9kHz gerando três sinais contínuos em diferentes faixas de frequência.

Os resultados obtidos mostraram que é possível detectar vazamentos através da detecção e análise dos ruídos sonoros gerados por vazamentos em vasos de pressão, mesmo quando a variação na pressão interna do vaso não é significativa. A resposta em frequência do sinal do vazamento variou com a magnitude do vazamento e com as diferentes condições de pressão no interior do vaso. O sistema desenvolvido mostrou que pode ser uma ferramenta confiável para a supervisão de vasos de pressão.

Palavras-chave: detecção de vazamentos; sistemas sônicos; vasos de pressão.

## ***ABSTRACT***

Pressure vessels are very important equipment in the industry, being responsible for storing gases, liquids and other fluids at high pressures. A small leakage on them can be very dangerous, generating pollution, explosion and also financial losses to the industry. For those reasons, it is essential to have a fast and efficient leakage detection system.

This work describes a leak detection technique of gas based on the analysis of the pressure in the vessel and the noise generated by the leak.

An experimental apparatus was set up using a 34.5 liters pressure vessel, fitted with a system to simulate sudden leakage through small orifices. Compressed air was used in the leakage experiments and the pressure in the vessel varied between 1 and 7 kgf/cm<sup>2</sup>. Leaks of various magnitudes were simulated through orifices with sizes varying between 0.1 and 4 mm in diameter. Leaks were detected when the vessel operated with a batch of air and also when the vessel was continuously fed with air.

The leak detection system used a microphone and a software, written in C language, for data acquisition through an ADA converter of the signals generated by a pressure transducer installed in the vessel and by the microphone which was placed inside the vessel. An electric circuit was developed to process the noise captured by microphone and had two different stages:- on the first, the signal was only amplified and, on the second stage, the signal was filtered through three band pass filters, centered in 1kHz, 5kHz and 9kHz each one, generating three continuous signals in different frequencies.

The experimental results show that it is possible to detect leaks based on the detection and analysis of sound noises generated by leak occurrence in pressure vessels even when yht pressure in the vessel does not change significantly. The analysis of the signal amplitude for different frequencies shows that the leakage noise signal changes with the leakage size and pressure in the vessel. The developed system shows to be a very reliable tool for safety supervision of pressure vessels.

Keywords: leak detection; leakage noise detection; pressure vessels.

## ***ÍNDICE***

|                                                               |      |
|---------------------------------------------------------------|------|
| <b>Resumo</b>                                                 | ii   |
| <b>Abstract</b>                                               | iii  |
| <b>Índice</b>                                                 | iv   |
| <b>Lista de Figuras</b>                                       | vii  |
| <b>Lista de Tabelas</b>                                       | viii |
| <br>                                                          |      |
| <b>1- INTRODUÇÃO</b>                                          | 1    |
| <b>1.1-Objetivos</b>                                          | 3    |
| <br>                                                          |      |
| <b>2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                               | 4    |
| <b>2.1- Principais métodos para detecção de vazamentos</b>    | 4    |
| Observação                                                    | 5    |
| Teste estático                                                | 5    |
| Variações inesperadas                                         | 5    |
| Gradientes de pressão                                         | 6    |
| Balanço de massa e volume                                     | 6    |
| Ondas de pressão negativas                                    | 6    |
| Simulação paralela                                            | 7    |
| Redes neurais artificiais                                     | 7    |
| Método baseado em sensores                                    | 7    |
| <b>2.2- Principais métodos baseados em sensores acústicos</b> | 8    |
| <br>                                                          |      |
| <b>3- MONTAGEM EXPERIMENTAL</b>                               | 19   |
| <b>3.1- Especificação dos equipamentos</b>                    | 21   |
| <b>3.1.1- Transdutor de pressão</b>                           | 21   |
| <b>3.1.2- Microfone</b>                                       | 22   |
| <b>3.1.3- Pré-Amplificador de Microfone</b>                   | 23   |
| <b>3.1.4- Banco de Filtros Passa-Faixa</b>                    | 26   |
| 1º Estágio: Filtro Ativo Butterworth Passa-Baixo              | 27   |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2º Estágio: Controle de Ganho                                                | 29 |
| 3º Estágio: Banco de Filtros Ativos Passa-Faixa                              | 30 |
| 4º Estágio: Circuito Retificador de Meia Onda                                | 33 |
| <b>3.1.5- Placa conversora Analógica-Digital-Analógica (ADA)</b>             | 35 |
| Multiplexador                                                                | 35 |
| Conversor Analógico-Digital (CAD)                                            | 36 |
| <b>3.1.6- Microcomputador</b>                                                | 37 |
| <br><b>4- SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS</b>                                  | 38 |
| <b>4.1- Descrição do sistema de aquisição de dados</b>                       | 38 |
| 4.1.1- Sensores e transdutores                                               | 38 |
| 4.1.2- Condicionador de sinais                                               | 38 |
| 4.1.3- Placa conversora Analógica-Digital-Analógica (ADA)                    | 39 |
| 4.1.4- Microcomputador                                                       | 39 |
| 4.1.5- Programa de aquisição de dados                                        | 39 |
| <b>4.2- Conversão do sinal analógico em digital</b>                          | 40 |
| 4.2.1-Conversão do sinal analógico proveniente do microfone                  | 41 |
| 4.2.2-Conversão do sinal analógico proveniente do transdutor de pressão      | 41 |
| <b>4.3- Temporização do programa de aquisição</b>                            | 42 |
| <b>4.4- Filtragem dos dados</b>                                              | 43 |
| Filtros analógicos                                                           | 43 |
| Filtro por média aritmética                                                  | 44 |
| <b>4.5- Programa de aquisição de dados</b>                                   | 44 |
| <b>4.6- Procedimento experimental</b>                                        | 45 |
| Vaso sem alimentação contínua                                                | 46 |
| Vaso com alimentação contínua                                                | 46 |
| <br><b>5- RESULTADOS E ANÁLISE</b>                                           | 47 |
| <b>5.1- Detecção de vazamento para o vaso sem alimentação contínua de ar</b> | 47 |
| <b>5.2- Detecção de vazamento para o vaso com alimentação contínua</b>       | 55 |

|                                                                                                                                                         |               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>6- CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>                                                                                                                        | <b>62</b>     |
| <b>6.1- Conclusões</b>                                                                                                                                  | <b>63</b>     |
| <b>6.2- Sugestões para trabalhos futuros</b>                                                                                                            | <b>64</b>     |
| <br><b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                                                                                                                   | <br><b>65</b> |
| <b>Referências da Rede Internet</b>                                                                                                                     | <b>67</b>     |
| <br><b>APÊNDICE A</b>                                                                                                                                   |               |
| Transientes de pressão e variações em amplitude do ruído sonoro, causados por diversos tipos de vazamentos num vaso de pressão sem alimentação contínua | 68            |
| <br><b>APÊNDICE B</b>                                                                                                                                   |               |
| Transientes de pressão e variações em amplitude do ruído sonoro, causados por diversos tipos de vazamentos num vaso de pressão com alimentação contínua | 78            |
| <br><b>APÊNDICE C</b>                                                                                                                                   |               |
| Diagrama elétrico do pré-amplificador de microfone                                                                                                      | 87            |
| <br><b>APÊNDICE D</b>                                                                                                                                   |               |
| Diagrama elétrico do circuito que compreende os filtros passa-faixa                                                                                     | 89            |
| <br><b>APÊNDICE E</b>                                                                                                                                   |               |
| Diagrama elétrico do circuito que compreende a fonte de tensão contínua utilizada para alimentar os dois circuitos eletrônicos desenvolvidos            | 91            |
| <br><b>APÊNDICE F</b>                                                                                                                                   |               |
| Programa desenvolvido para a aquisição on-line dos dados provenientes do microfone e do transdutor de pressão                                           | 93            |

## ***LISTA DE FIGURAS***

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1- Vasos de pressão em operação                                                     | 1  |
| 2.1- Sinal acústico medido na tubulação de um gerador de vapor                        | 9  |
| 2.2- Projeção em 2D da localização de peças frouxas através do mapa de contorno       | 10 |
| 2.3- Sistema de detecção de vazamentos com câmara acústica                            | 11 |
| 2.4- Detecção por microfone                                                           | 11 |
| 2.5- Detecção por sensor de emissão acústica                                          | 11 |
| 2.6- Gráfico do monitoramento <i>on-line</i> de vazamentos                            | 13 |
| 2.7- Intensidade do ruído versus localização dos microfones                           | 15 |
| 2.8- Estrutura do sistema de detecção de vazamento por microfones                     | 15 |
| 2.9- Função de correlação cruzada                                                     | 16 |
| 2.10- CCF para um canal (A); CCF para 4 canais utilizando algoritmo (B)               | 17 |
| 3.1- Esquema representativo da montagem experimental                                  | 19 |
| 3.2- Vaso de pressão                                                                  | 20 |
| 3.3- Orifícios, para simulação de vazamentos                                          | 20 |
| 3.4- Microfone capacitivo                                                             | 22 |
| 3.5- Foto microfone CZN-15E                                                           | 23 |
| 3.6- Resposta em frequência                                                           | 23 |
| 3.7- Pré-amplificador de microfone                                                    | 24 |
| 3.8- Gráficos fornecidos pela simulação no programa CIRCUITMAKER                      | 25 |
| 3.9- Sinal de saída do pré-amplificador de microfone                                  | 26 |
| 3.10- Vaso de pressão e pré-amplificador de microfone                                 | 26 |
| 3.11- 1º Estágio: Filtro Ativo Butterworth Passa-Baixo de segunda ordem               | 28 |
| 3.12- Resposta em frequência do filtro ativo Butterworth Passa-Baixo de segunda ordem | 28 |
| 3.13- Estágio 2: Amplificador Operacional                                             | 29 |
| 3.14- 3º Estágio: Filtros ativos Biquadráticos                                        | 31 |
| 3.15- Resposta em frequência dos filtros ativos passa-faixa                           | 33 |
| 3.16- Retificador de meia onda com uso de diodo e resistência                         | 34 |
| 3.17- Retificador de meia onda com uso de diodo e capacitor                           | 34 |
| 3.18- 4º Estágio: Retificador de meia onda                                            | 35 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.19- Esquema representativo do multiplexador                                      | 36 |
| 3.20- Esquema representativo do funcionamento do sampler                           | 37 |
| 5.1- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,1 mm)         | 47 |
| 5.2- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,4 mm)         | 48 |
| 5.3- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,8 mm)         | 49 |
| 5.4- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,0 mm)         | 50 |
| 5.5- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,1 mm)         | 51 |
| 5.6- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,5 mm)         | 52 |
| 5.7- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 2,0 mm)         | 53 |
| 5.8- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 3,2 mm)         | 54 |
| 5.9- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 4,0 mm)         | 54 |
| 5.10- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,1 mm)        | 55 |
| 5.11- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,4 mm)        | 56 |
| 5.12- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,8 mm)        | 57 |
| 5.13- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,0 mm)        | 58 |
| 5.14- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,1 mm)        | 59 |
| 5.15- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,5 mm)        | 60 |
| 5.16- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 2,0 mm)        | 61 |
| 5.17- Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifícios 3,2 e 4,0 mm) | 61 |

### ***LISTA DE TABELAS***

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 4.1- Entrada e saída do conversor A/D | 40 |
|---------------------------------------|----|

## 1- INTRODUÇÃO

Os vasos de pressão são, basicamente, reservatórios que contêm fluidos pressurizados e, quanto maior a pressão que o vaso pode suportar, maior a quantidade de fluido que ele pode armazenar, desde que o fluido armazenado seja compressível (Figura 1.1).

Com o aumento da pressão interna do vaso, existe o risco de rompimento do reservatório ou dos dutos que o acompanham, ocasionando vazamento instantâneo, o qual pode atingir grandes proporções dependendo de sua pressão e volume.

Dentre as indústrias que trabalham com vasos de pressão, pode-se citar as refinarias de petróleo, indústrias de processos, indústrias químicas e petroquímicas, grande parte das indústrias alimentícias e farmacêuticas, centrais termoelétricas, terminais de processamento, armazenagem e distribuição de produtos do petróleo e/ou gás natural em terra ou mar, siderúrgicas e instalações do ciclo nuclear.



Figura 1.1 – Vasos de pressão em operação

De todos esses ambientes de trabalho, é nas indústrias de processos onde deve haver maior grau de confiabilidade nos equipamentos, pois estas trabalham em regime contínuo, durante o dia e a noite, por meses seguidos, não havendo tempo hábil para manutenção e inspeção do equipamento. Outro fator é que os diversos equipamentos formam uma cadeia contínua onde a falha ou paralisação de um único equipamento obriga a paralisação de toda a instalação, resultando em grandes prejuízos e perda de produção.

Os vasos de pressão constituem não só os equipamentos mais importantes da maioria das indústrias de processo, como também são geralmente os itens de maior tamanho, peso e custo unitário nessas indústrias, representando em média 60% do custo total dos materiais e equipamentos de uma unidade de processo. Esses mesmos equipamentos são igualmente presentes, como itens de maior importância, em muitas outras indústrias de outros ramos.

Devido à ocorrência de graves acidentes envolvendo vasos de pressão nos Estados Unidos, houve o desenvolvimento de uma legislação onde foram criados códigos de fabricação e inspeção destes equipamentos, juntamente a adoção de crescente tecnologia de monitoramento, responsável pela rápida e precisa detecção de vazamentos que podem causar significativos impactos econômicos, danos ambientais, prejuízo às empresas e principalmente perdas fatais (<http://www.target.com.br/portal/asp/matéria/matéria>; MACIAS, 2004).

O código ASME (The American Society of Mechanical Engineers) tem como principal objetivo garantir a segurança de equipamentos que utilizam vasos de pressão. Foi elaborado a partir da necessidade de se fixar regras para o projeto, construção, operação e manutenção estabelecendo critérios de segurança ligados à fabricação e inspeção de vasos de pressão. Regularmente é atualizado a partir de estudos criteriosos para garantir a segurança de operadores e equipamentos das indústrias dos vários setores que trabalham com vasos de pressão (<http://www.target.com.br/portal/asp/matéria/matéria>).

No Brasil, o Ministério do Trabalho sempre manifestou sua preocupação com a segurança de operadores de equipamentos, regulamentando e normatizando sua inspeção e operação. Para tanto a Norma Regulamentadora número 13 (NR-13) da portaria 3.214/78 do Ministério do Trabalho, define vários parâmetros de segurança e inspeção dos vasos de pressão e operadores (<http://www.sobes.org.br/nr13.htm>).

Inúmeros contratempos podem ocorrer, no percurso de um vaso de pressão, podendo ser alguns deles devidos à falha humana causando grandes danos, prejuízos de vulto e outras situações envolvendo perdas de vida sejam por operações inadequadas, por distrações, ou mesmo desconhecimento.

Uma falha comum é a mecânica, onde se percebe que a construção do equipamento não seguiu as normas técnicas vigentes no país e ou mesmo as adotadas internacionalmente, conhecidas como normas universais. Deve-se lembrar que os vasos de pressão são formados

por inúmeros equipamentos, existindo nos reservatórios válvulas de segurança, manômetros, purgadores de descarga, transdutores, entre outros e que podem, em qualquer momento, desenvolver uma falha sistêmica.

Por fim, há falhas por razões econômicas e financeiras onde em alguns casos o proprietário da empresa tenta economizar comprando peças para restauração do equipamento em locais não credenciados e licenciados para estas tarefas (<http://www.crassessoriatrabalhista.com.br/pages/vasos.asp>).

Por todos esses motivos, é imprescindível a adoção de uma tecnologia de monitoramento contínuo capaz de detectar vazamentos de qualquer grandeza de modo que uma ação possa ser tomada a tempo de evitar maiores prejuízos.

### ***1.1- Objetivos***

Considerando a importância dos sistemas de detecção de vazamentos em vasos de pressão, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento e teste de uma técnica de detecção de vazamentos de gás em vasos de pressão através da detecção e análise em tempo real do ruído sonoro gerado pelo vazamento, bem como da variação de pressão interna do vaso.

Na montagem experimental utilizou-se um vaso de pressão contendo ar comprimido a uma pressão de até 7 kgf/cm<sup>2</sup> e, vazamentos de várias magnitudes foram simulados através de orifícios de diâmetro variável, na faixa de 0,1 mm a 4,0 mm. A aquisição de dados em tempo real foi realizada através de um microfone e de um transdutor de pressão, conectados a um microcomputador através de uma placa conversora Analógica-Digital-Analógica.

O estudo foi realizado em duas etapas: (1) detecção de vazamentos com o vaso operando em batelada (sem alimentação contínua de gás) e (2) detecção de vazamentos durante alimentação contínua de gás para o vaso. Em ambas as etapas foram comparadas a variação do ruído sonoro provocado pelo vazamento com a variação da pressão interna do vaso.

## ***2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

A detecção de vazamentos é uma etapa importante na operação segura de tubulações e vasos de pressão. São vários os tipos de vazamentos que podem ocorrer nesses sistemas, assim como são vários os detectores capazes de analisar cada tipo.

Os vazamentos gerados devidos às rupturas são os menos comuns, mas muito perigosos, podendo causar danos significativos ao meio ambiente, bem como grandes perdas financeiras para a indústria. Esses vazamentos são os mais fáceis de serem detectados, pois são acompanhados de variações significativas de pressão e volume, facilmente mensuráveis.

Os vazamentos mais difíceis de serem detectados, porém igualmente perigosos, são aqueles provocados por corrosão, fadiga, erosão e falhas nas soldas ou junções. Esses vazamentos são de menor grandeza, no entanto grande quantidade de produto pode ser perdida antes que sejam notados.

Muitas plantas modernas são projetadas para satisfazer certos critérios de segurança. A teoria “leak before brake” prediz que qualquer falha nas soldas ou junções irá gerar um pequeno vazamento o qual poderá aumentar lentamente conduzindo a uma repentina despressurização do vaso com uma rápida perda de fluido. Essa filosofia requer o desenvolvimento de técnicas capazes de detectar e monitorar qualquer vazamento em tempo suficiente para que uma ação seja tomada (MACLEOD et al., 1990).

Este capítulo apresenta as técnicas em que se baseiam os diversos métodos de detecção de vazamentos citados na literatura. São analisados também os trabalhos mais relevantes sobre detecção através do ruído acústico emitido por vazamentos em tubulações e vasos de pressão.

### ***2.1- Principais métodos para detecção de vazamentos***

Segundo SANDBERG et al. (1989), os sistemas de detecção podem ser classificados em duas categorias principais: estático e dinâmico. Sistemas dinâmicos são preferidos desde

que possam ser utilizados enquanto a tubulação está operando. Métodos estáticos de detecção são úteis depois que o vazamento tenha sido detectado, de modo a encontrar sua localização.

WIKE (1986) enumera várias técnicas de detecção e localização de vazamentos baseadas no sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): teste estático, variações inesperadas, gradientes de pressão, balanço de massa, ondas de pressão negativa e simulação paralela.

BLACK (1992) classificou os sistemas de detecção de vazamentos nas seguintes categorias: observação, métodos baseados em sensores, “pigs” inteligentes, análise a partir de medidas de pressão, balanço de volume e modelagem matemática.

A seguir, estão descritos os principais métodos de detecção de vazamentos em tubulações e vasos de pressão.

### **Observação:**

A forma mais simples de detectar vazamentos é através da observação periódica do sistema, através da inspeção visual de sua integridade. Um método similar é a injeção de aditivos químicos e gases atóxicos provendo odor. A eficácia desse método pode deteriorar dependendo das condições ambientais e da direção do vento, (BLACK, 1992).

### **Teste estático**

Método capaz de identificar pequenos vazamentos, diferindo de outras técnicas por poder ser aplicado somente com o sistema fora de operação. Baseia-se no fato de que num sistema sem fluxo, uma queda de pressão é indicativa de vazamento, (WIKE, 1986).

### **Variações inesperadas**

Um dos métodos mais diretos de detecção de vazamentos em uma tubulação é o método da variação de pressão e fluxo. Um vazamento pode causar um aumento no fluxo simultaneamente com a diminuição da pressão interna da tubulação. Esse método aplica-se

somente ao transporte, em estado estacionário, de fluidos incompressíveis, pois o contrário pode levar a falsos alarmes, além do que somente rupturas são detectáveis, (WIKE, 1986).

### **Gradientes de pressão**

É uma das técnicas de detecção mais comuns dentre aquelas baseadas no sistema SCADA. Opera com o princípio de que um vazamento deve distorcer o perfil de pressão ao longo de uma seção da tubulação. Instalando-se transdutores de pressão nas extremidades das seções, o gradiente médio ao longo da linha pode ser calculado e qualquer variação desse gradiente indica a ocorrência de vazamento. É possível localizar o vazamento através da interpolação entre as medidas de pressão, (WIKE, 1986; BLACK, 1992).

### **Balanco de massa e volume**

O vaso de pressão ou a tubulação são equipados com medidores de fluxo na entrada e na saída, sendo que as taxas de fluxo são comparadas continuamente em tempo real. Qualquer diferença entre a taxa de fluxo nas duas extremidades significa um vazamento. O método pode levar a falsos alarmes pelo fato de que a taxa de fluxo depende de vários parâmetros do fluido (temperatura, pressão, densidade e viscosidade), (WIKE, 1986; BLACK, 1992).

SANDBERG et al. (1989) analisam um método baseado nesse princípio. Esse sistema de segurança dispara um alarme quando a diferença de volume entre a entrada e saída da tubulação é superior a 2% para líquidos e 10% para gases. A grande desvantagem deste método é a necessidade de um grande intervalo de tempo para que vazamentos de menor grandeza sejam detectados, ocasionando grandes perdas de produto.

### **Ondas de pressão negativas**

Quando um vazamento ocorre numa linha, uma rápida queda de pressão ocorre na posição do mesmo, originando uma onda de pressão negativa que se propaga à velocidade do som em ambos os sentidos. É possível determinar a existência e a localização aproximada do

vazamento através do monitoramento do progresso da onda em ambos os lados do vazamento, registrando-se o tempo durante o qual a onda avança ao longo da linha, (WIKE, 1986).

### **Simulação paralela**

Largamente utilizada em sistemas de tubulações não complexas (linhas de transmissão com poucas ramificações) o modelo da simulação paralela é conduzido por um número limitado de medições reais da tubulação, tipicamente pressões a montante e fluxos a jusante. A partir daí, o modelo estima pressões e fluxos a jusante e, posteriormente, estima pressões, fluxos e outras variáveis em posições intermediárias ao longo da tubulação. Essas medições podem ser comparadas com medições reais nos pontos intermediários, e suas discrepâncias utilizadas para detectar vazamentos, (WIKE, 1986).

### **Redes neurais artificiais**

BELSITO et al. (1998) desenvolveram um sistema de detecção e localização de vazamentos em tubulações transportando gás liquefeito baseado em redes neurais artificiais. A rede foi treinada com dados simulados e testada levando em consideração os sinais de ruídos existentes na tubulação. No sistema em estudo, foram detectados vazamentos de 1% do fluxo de entrada e a localização de vazamentos maiores (5%, 10%) foi feita com alta confiabilidade mesmo na presença de ruídos.

### **Método baseado em sensores**

*Sensores térmicos e eletroópticos:* são sensores capazes de detectar o fluido através de sua assinatura (picos) no espectro infravermelho. Um sistema similar usa imagens infravermelhas térmicas.

*Sensores de ação seletiva:* a evidência do vazamento de produtos pode ser deduzida pelas mudanças nas propriedades eletromagnéticas de cabos enterrados ou por sensores seletivos para uma substância específica.

CHUNG e LEE (2001) desenvolveram um sistema de monitoramento (multicanal) para vazamento de gás natural, baseado em sensores de  $\text{SnO}_2$  que apresentam detecção seletiva de metano ou gás natural.

*Sensores de ruídos ultra-sônicos:* instrumentos baseados na detecção do ruído criado pelo vazamento, produzido na faixa de frequências ultra-sônicas. O software associado deve ser desenvolvido cuidadosamente de modo a filtrar os ruídos externos.

*Métodos acústicos:* São métodos baseados em sensores capazes de detectar vibrações acústicas originadas por vazamentos muito pequenos em curto espaço de tempo.

## ***2.2- Principais métodos baseados em sensores acústicos***

Os métodos acústicos estão sendo utilizados de forma crescente para monitorar as condições em uma planta química em operação. O fato é que as ondas acústicas podem viajar através de estruturas e fluidos até sensores remotos, significando que instrumentos acústicos são relativamente fáceis de instalar e, com apenas alguns sensores, possibilitam uma supervisão abrangente da planta assegurando sua integridade estrutural.

O sucesso na supervisão depende da existência de bons sensores situados em locais apropriados e também de um sistema satisfatório de amplificação e gravação dos dados amostrados. Técnicas de processamento de sinal também são requeridas para extrair as informações importantes dos dados coletados, (MACLEOD et al., 1990).

Freqüentemente, o uso de técnicas relativamente simples como monitorar a amplitude do sinal acústico em determinada banda de frequência ou contar a taxa de ocorrência de impulsos acústicos pode proporcionar resultados satisfatórios.

KRYTER (1984) apresentou um estudo para identificação de peças frouxas ou soltas em tubulações. A técnica pode detectar e localizar o ruído acústico gerado através do impacto das peças que estão frouxas ou estão fora de lugar, uma vez que o impacto desses componentes pode causar danos nas tubulações afetando sua integridade estrutural. Se a fonte de ruído acústico pode ser localizada, então o problema pode ser identificado e uma ação

preventiva poderá ser tomada.

A experiência foi realizada em uma tubulação, conectada a um gerador de vapor, na qual foi colocado um transdutor acústico em uma das extremidades. A Figura 2.1 mostra a amplitude do sinal acústico medido para o gerador sem a presença de uma peça frouxa (A) e com a presença de uma peça frouxa (B).

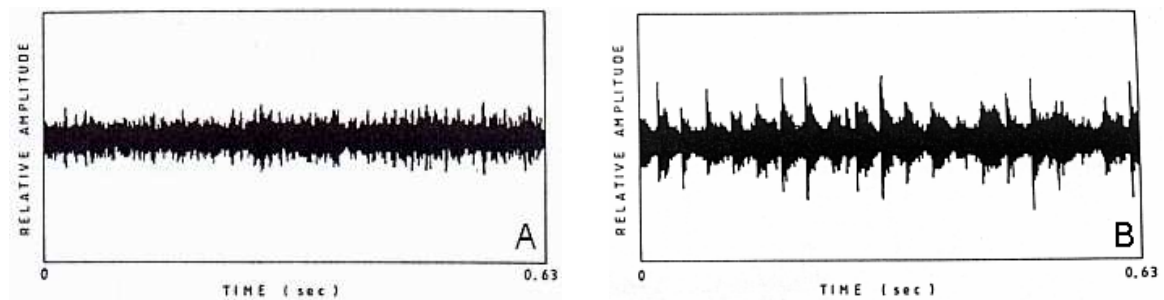


Figura 2.1- Sinal acústico medido na tubulação de um gerador de vapor

Na Figura 2.1B, é mostrado os pulsos produzidos por impactos regulares devido à vibração de uma peça frouxa no gerador. Além da detecção, KRYTER (1984) propôs um método de localização da peça frouxa de modo a facilitar a inspeção do reator.

A técnica consiste em colocar seis guias de onda, transdutores capazes de captar os pulsos produzidos pelo impacto da peça solta, na parede do gerador e medir a diferença no tempo de resposta de cada par. Um algoritmo analisa esses tempos e a posição é indicada onde o erro computado é mínimo. A solução é melhor visualizada graficamente, em um mapa de contorno, o erro residual normalizado com a equivalente distância entre os guias de onda, como mostra a Figura 2.2.

KRYTER (1984) concluiu que é possível detectar e localizar fontes de ruído em geradores de vapor mesmo com as dificuldades encontradas, como complexidade e grande quantidade de tubos envolvidos na planta, e os resultados indicam que a análise acústica pode dar uma contribuição valiosa na detecção de ruídos.

KUPPERMAN, PRINE e MATHIESON (1988) compararam dois tipos de sensores capazes de detectar o ruído gerado pelo vazamento de vapor numa tubulação de saída de um reator. Na primeira experiência, foi utilizado um sensor de emissão acústica capaz de detectar

freqüências na faixa de 100kHz a 1MHz e, na segunda, foi utilizado um microfone, capaz de detectar freqüências de até 100kHz. O orifício utilizado para simular o vazamento foi de 0,5mm nas duas experiências.

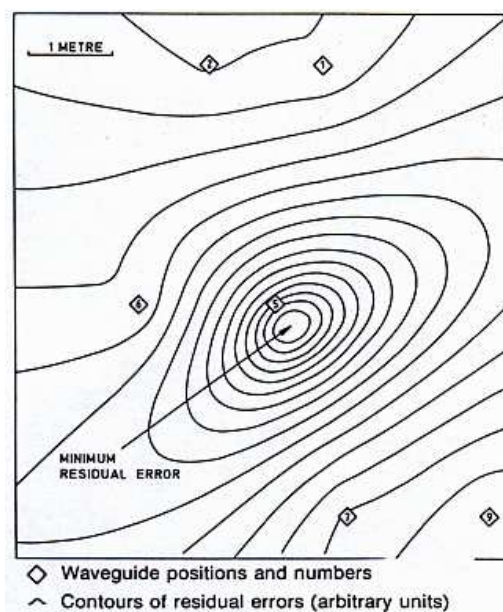


Figura 2.2- Projeção em 2D da localização da peças frouxas através do mapa de contorno

O sensor de emissão acústica, instalado na parede do vaso ou tubulação, capta vibrações geradas pelo escape do fluido, que são transmitidas através da estrutura. No entanto, sensores montados na superfície são igualmente sensíveis às vibrações geradas devido a uma operação normal da planta ou aos ruídos externos, o que dificulta uma correta detecção.

Na segunda experiência, foi utilizado um microfone localizado longe da parede da estrutura, uma vez que o som se propaga pelo ar. Foi criada uma câmara acústica com o próprio material utilizado na isolamento térmica da tubulação e, para evitar o aquecimento do microfone, este foi colocado do lado de fora da câmara e conectado através de um tubo de ar, como pode ser visto na Figura 2.3.

O resultado experimental mostrou que normalmente o ruído gerado no plano de fundo da planta cai com o aumento da freqüência e a banda de freqüência ótima para medir o ruído gerado pelo vazamento fica entre 20kHz e 40kHz.

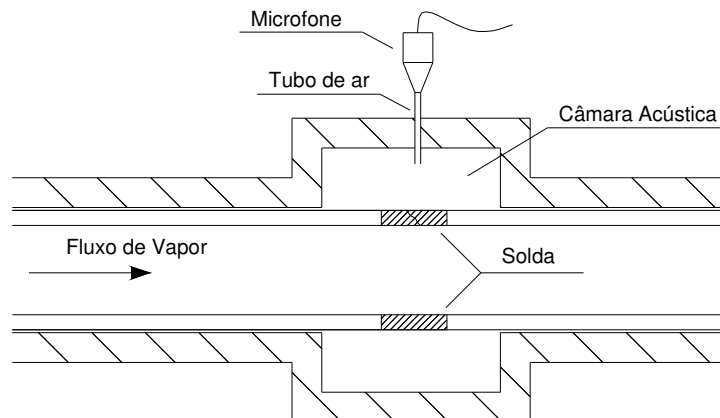


Figura 2.3 – Sistema de detecção de vazamentos com câmara acústica

As Figuras 2.4 e 2.5 mostram o espectro de sinal medido por um microfone e por um sensor de emissão acústica respectivamente.

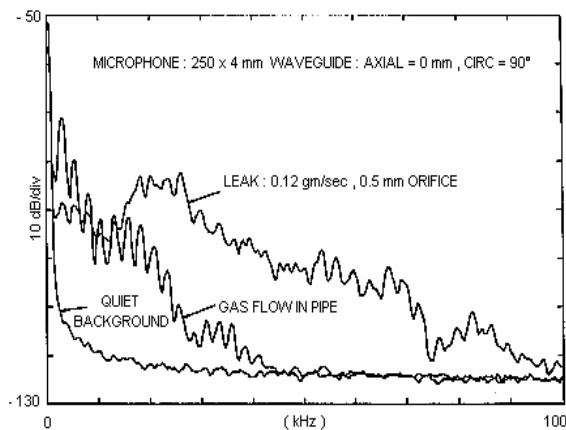


Figura 2.4 – Detecção por microfone

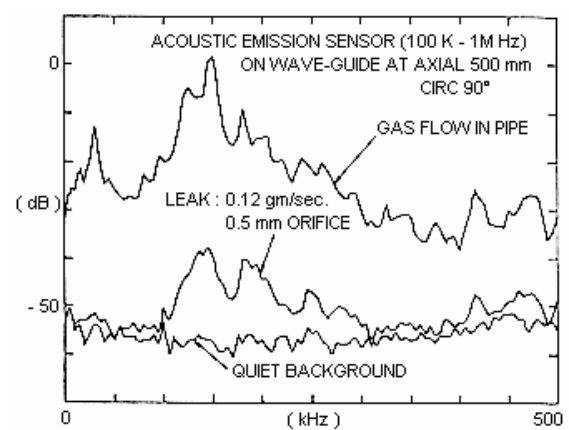


Figura 2.5 – Detecção por sensor de emissão acústica

KUPPERMAN, PRINE e MATHIESON (1988) concluíram que a detecção de vazamentos através do sensor de emissão acústica não foi possível porque a vibração referente ao fluxo de vapor dentro da tubulação era maior do que a vibração referente ao vazamento. Por outro lado, utilizando-se de um microfone, o ruído gerado pelo vazamento foi muito maior

que o ruído gerado pelo fluxo de vapor indicando o vazamento. No ensaio, o microfone localizado dentro da câmara mostrou-se 40dB mais sensível que o método utilizando o sensor de emissão acústica localizado junto à estrutura.

STREICHER (1990) apresentou conceitos de um sistema de monitoramento acústico tanto de peças frouxas como de detecção e monitoramento de vazamentos e sua possível localização. O sistema permite um reconhecimento adiantado dos desvios de uma operação normal e possibilita uma rápida ação corretiva a fim de impedir danos ao ambiente e ao equipamento.

No sistema de monitoramento e localização de vazamento, foi observado que o ruído de operação e o ruído gerado pelo vazamento são independentes, ou seja, numa operação normal o ruído de fundo é conhecido e estabelecido como “off-set” e, qualquer alteração nesse ruído significa um vazamento. A Figura 2.6 representa a diferença entre as amplitudes do ruído de fundo e do ruído gerado pelo vazamento.

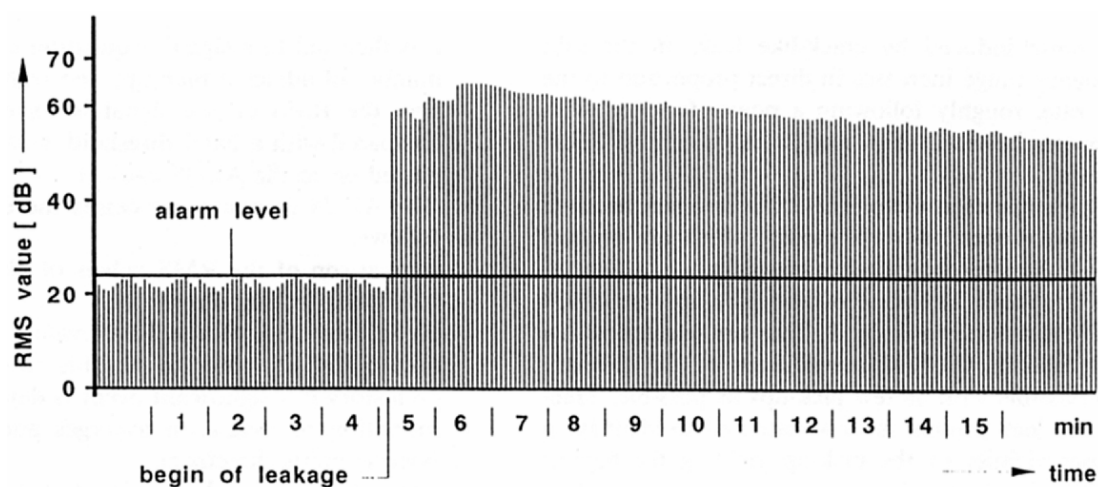


Figura 2.6 – Gráfico do monitoramento *on-line* de vazamentos.

Os ruídos são captados por microfones piezoelétricos presos contra a estrutura. A localização do vazamento também pode ser determinada por comparação entre as amplitudes dos ruídos gerados em diferentes pontos ao longo da tubulação como visto na Figura 2.7.

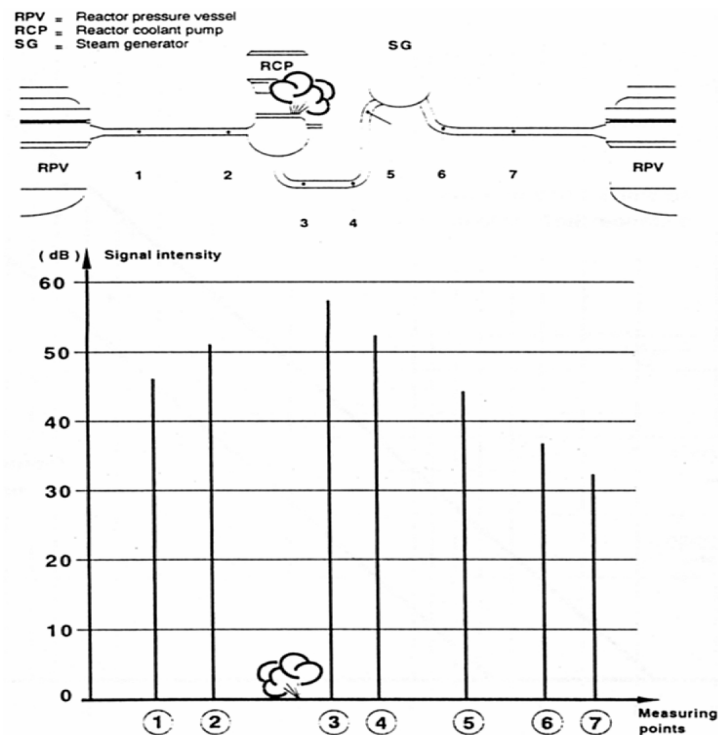


Figura 2.7 – Intensidade do ruído versus localização dos microfones

STREICHER (1990) observou que vazamentos menores que 5 litros/hora podem ser detectados e localizados numa situação onde o ambiente externo é relativamente silencioso e a magnitude do vazamento pode ser estimada com uma precisão de  $\pm 40\%$  através da amplitude do ruído gerada em função da taxa de vazamento.

WATANABE e HIMMELBLAU (1991) apresentaram um estudo com base na propagação de ondas acústicas emitidas por um vazamento em tubulação fechada, contendo gás a uma pressão de  $0,5 \text{ kgf/cm}^2$ . Um microfone instalado em uma das extremidades da tubulação é responsável por detectar e medir a frequência das ondas de pressão geradas pelo vazamento. O método é baseado num modelo matemático que descreve o fenômeno acústico e na detecção das ondas. Essas ondas possuem forma de pulso e o instante em que elas aparecem juntamente com sua amplitude indicam a posição e a magnitude do vazamento. Os experimentos foram realizados em uma tubulação de 10 metros de comprimento e sem escoamento de gás.

SHEEN, CHIEN e RAPTIS (2000) descreveram duas técnicas de detecção de

vazamento do gás hélio no ar. A primeira é através da onda acústica de superfície (SAW) que detecta mudanças de condutividade térmica na mistura ar/hélio e a segunda através do método da velocidade do som.

A técnica SAW utiliza um sensor, cujo revestimento de superfície é sensível ao gás hélio. Como o hélio é um gás nobre e não interage quimicamente com a maioria dos materiais, o sensor é projetado para detectar o hélio através da mudança de temperatura na superfície, pois o gás hélio tem uma condutividade térmica muito mais elevada do que a do ar. O sensor térmico utiliza um substrato piezoelétrico cuja frequência na saída é proporcional ao coeficiente de temperatura da mistura

A segunda técnica utiliza a propriedade física de que a velocidade do som no hélio é muito maior que no ar (1015 contra 356 m/s). Através da velocidade do som é possível quantificar a porcentagem em volume de hélio na mistura ar/hélio.

Através das duas técnicas, SHEEN, CHIEN e RAPTIS (2000) demonstraram a capacidade de detecção de vazamento de hélio. Observou-se que a técnica utilizando o efeito térmico é eficiente na detecção de vazamentos superiores a  $10^{-4}$  cm<sup>3</sup>/s e que a técnica utilizando o método da velocidade do som é sensível para concentrações acima de 5 ppm.

SHIMANSKIY, IJIMA e NAOI (2003) apresentaram um sistema de detecção e localização de pequenos vazamentos, na ordem de 0,046m<sup>3</sup>/h, através de microfones resistentes a altas temperaturas instalados num avançado reator térmico na usina nuclear de Fugen, no Japão. Os microfones foram instalados dentro das caixas de vedação térmica, que isolam as tubulações de entrada do reator. Nesse caso, a parte superior do microfone, capaz de suportar temperaturas superiores a 300°C, fica no interior da caixa enquanto que o transdutor é mantido do lado de fora.

A Figura 2.8 mostra a estrutura do sistema de detecção de vazamento. O sistema foi dividido em três sub-sistemas chamados de PC-A, PC-W e PC-C. O sub-sistema PC-A pretende fornecer uma rápida detecção fazendo uma varredura do ruído gerado pelo vazamento medido por todos os microfones simultaneamente. O sub-sistema PC-W trabalha utilizando outros tipos de análise como espectro de frequência, correlação cruzada e outros

algoritmos, que podem fornecer uma sensibilidade mais elevada, mas que requerem um maior tempo de processamento. O sub-sistema PC-C é um terminal de controle localizado na sala de controle e conectado aos outros sub-sistemas através de um modem. Foi utilizado também um sistema, instalado dentro da caixa, para simular o vazamento. Esse sistema é composto por um compressor e simula o vazamento de 0,2 gpm (0,046 m<sup>3</sup>/h), através de um bocal com minúsculos furos.

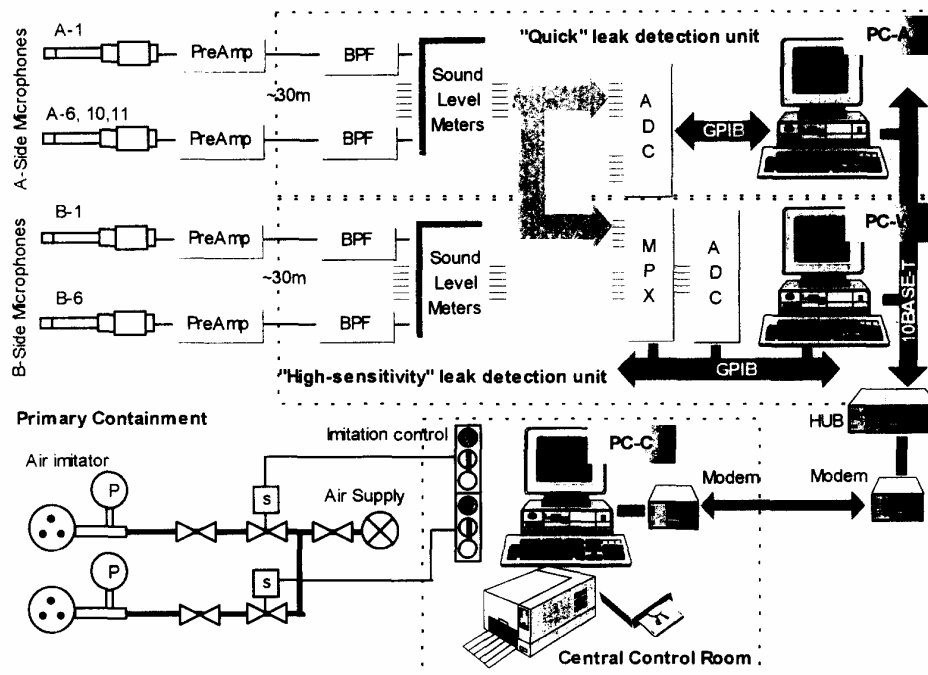


Figura 2.8 - estrutura do sistema de detecção de vazamento por microfones

Para a detecção, SHIMANSKIY, IJIMA e NAOI (2003) ) estabeleceram uma relação entre a amplitude do ruído emitido pelo vazamento na tubulação de resfriamento do reator e a atenuação que este ruído sofre devido à caixa de isolamento térmico. Esse valor é comparado com o ruído de fundo da planta em operação. Observou-se que o ruído externo devido às bombas de recirculação e os ventiladores de refrigeração são as principais fontes de ruído de baixa frequência e que podem interferir na correta detecção do vazamento.

Para diminuir a interferência devido ao ruídos de fundo, foi feito um estudo para determinar a melhor localização dos microfones dentro da caixa de modo a possibilitar uma correta detecção de vazamento. Foi utilizado um método 3D que faz a distribuição espacial do ruído de fundo dentro da caixa e a posição relativa do microfone. O diagrama 3D pode fornecer uma imagem mais exata da área detectável sob a geometria real das caixas.

Além do método para localização dos microfones, SHIMANSKIY, IJIMA e NAOI (2003) propuseram diversas melhorias de modo a conseguir uma melhor sensibilidade e confiabilidade do sistema como: correlação cruzada, base de localização e aproximação por multi-canais.

A correlação cruzada foi empregada para detectar o ruído de fundo e também para tentar localizar o ruído gerado pelo vazamento dentro da caixa, através do tempo de chegada dos sinais aos diferentes microfones. Entretanto, o algoritmo de correlação é afetado pela difração do som nas tubulações e em outros obstáculos dentro das caixas. A Figura 2.9 A mostra um exemplo da função de correlação cruzada, entre dois microfones, medido dentro das caixas sob as seguintes circunstâncias: parada programada do reator e reator em funcionamento.

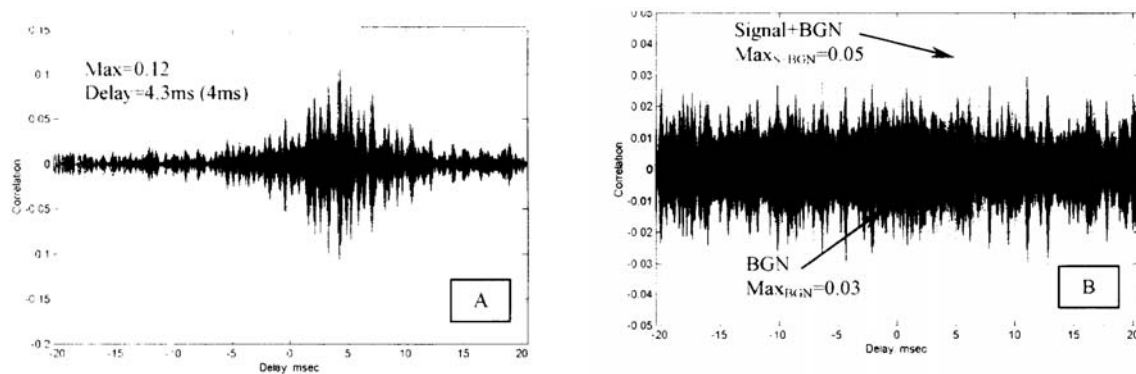


Figura 2.9 – Função de correlação cruzada

Verificou-se que, mesmo na ausência do ruído de fundo, o valor de pico é muito baixo e sua posição não pode ser localizada de forma exata. A Figura 2.9 B mostra a mesma

experiência, mas realizada sob ruído de fundo com o reator em funcionamento.

O método de localização utiliza um procedimento derivado das funções de correlação cruzada, baseado na análise do tempo de chegada dos sinais aos diferentes microfones. A posição do vazamento pode ser estimada como um ponto, no espaço 3D, que minimiza um critério de erro. Esse método é teoricamente exato, entretanto, uma pequena distorção no sinal em seu tempo de chegada ao microfone resulta em erros, diminuindo a exatidão do procedimento.

Outro método estudado por SHIMANSKIY, IJIMA e NAOI (2003) é a aproximação por multi-canais, que torna possível aplicar a técnica de localização espacial utilizando os valores da correlação cruzada medidos em diferentes posições por diferentes pares de microfones. Isso é feito através de um algoritmo capaz de calcular o atraso entre os diversos pares de microfones.

Na presença de um ruído gerado por um vazamento, a função de correlação cruzada (CCF) não apresenta atraso, tendo seu pico próximo a zero, enquanto que a função representada apenas pelo ruído de fundo (BGN) apresenta picos aleatórios (Figura 2.10 A). A diferença no atraso é devida à localização dos microfones dentro da caixa. O algoritmo de multi-canais é utilizado para enfatizar as funções que tem seu pico próximo ao atraso zero e para suprimir as funções que tem o pico longe do atraso zero, como pode ser visto na Figura 2.10 B.

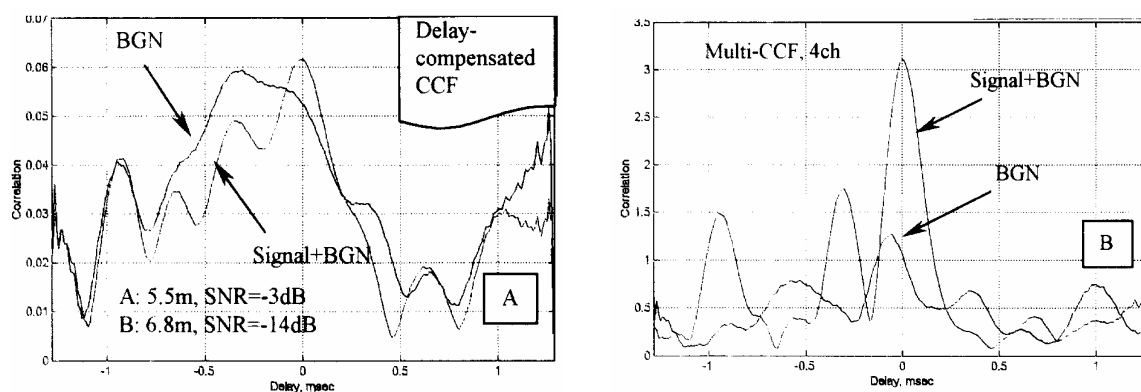


Figura 2.10 – CCF para um canal (A); CCF para 4 canais utilizando algoritmo (B).

A técnica multi-canais faz a detecção possível dos sinais com a relação sinal-ruído (SNR) menor que  $-3$  dB e em distâncias de até 5,5 metros. Além disso, a eficiência da detecção é proporcional ao aumento no número de canais.

SHIMANSKIY, IIJIMA e NAOI (2003) chegaram à conclusão de que é possível detectar pequenos vazamentos através do ruído gerado e que as técnicas de multi-canais e de localização são utilizadas a fim de melhorar a sensibilidade e a confiabilidade da detecção.

### 3 - MONTAGEM EXPERIMENTAL

Este capítulo tem como objetivo a descrição dos equipamentos utilizados na detecção de vazamentos de gás em um vaso de pressão, através do método acústico. Um microfone foi desenvolvido no laboratório para captar o ruído sonoro gerado por vazamentos no vaso de pressão. Neste capítulo encontram-se especificados todos os equipamentos que compõem a montagem experimental.

O esquema da montagem experimental, construída em laboratório, para simular a ocorrência de vazamentos em um vaso de pressão é mostrado na Figura 3.1.

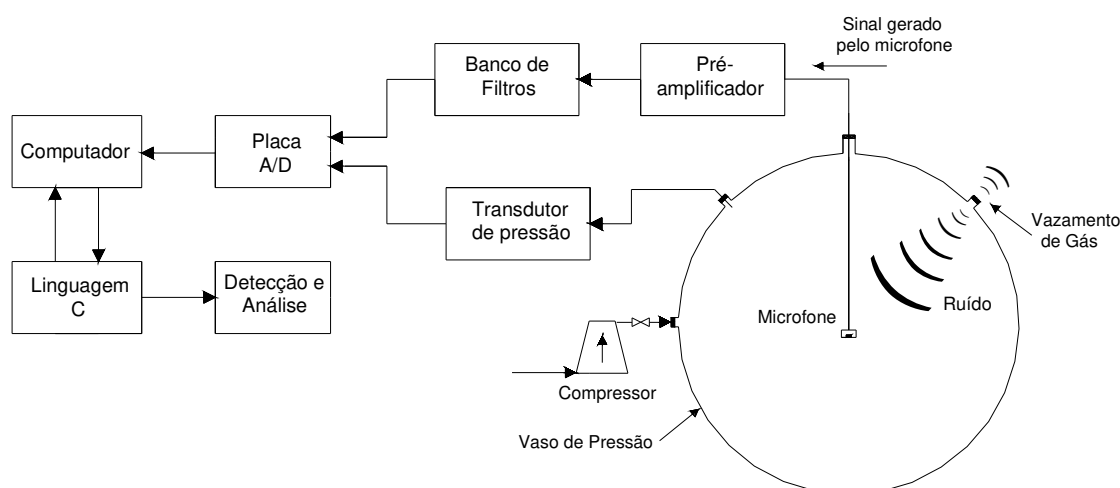


Figura 3.1 – Esquema representativo da montagem experimental

Como vaso de pressão utilizou-se um botijão de gás, novo, com capacidade para armazenar 34,5 litros de ar comprimido a uma pressão de até 19 kgf/cm<sup>2</sup>. O ar utilizado foi alimentado através de uma válvula gaveta instalada na lateral do vaso, a partir da linha de ar comprimido que serve os laboratórios da FEQ, a uma pressão de até 7 kgf/cm<sup>2</sup>.

Duas saídas laterais foram instaladas no vaso, a primeira contendo uma válvula gaveta para regular a alimentação de ar, e a segunda contendo uma válvula de abertura rápida para provocar o vazamento. A magnitude do vazamento foi controlada através de orifícios de

diâmetro variável instalado na saída lateral do vazamento, entre a superfície do vaso e a válvula de abertura rápida. O diâmetro do orifício variou de 0,1 mm a 4mm.

As Figuras 3.2 e 3.3 mostram a montagem experimental e os orifícios utilizados, respectivamente.



Figura 3.2 – Vaso de pressão



Figura 3.3 – Orifícios, para simulação de vazamentos

O monitoramento do vaso de pressão foi feito através de um microfone localizado no interior do vaso e de um transdutor de pressão instalado na lateral do vaso, ambos conectados a um microcomputador através de uma placa ADA (Analógica-Digital-Analógica).

O microfone foi desenvolvido no laboratório para captar o ruído sonoro gerado pelo vazamento, enquanto que o transdutor foi utilizado apenas para permitir o monitoramento on-line da variação da pressão no interior do vaso.

Para compatibilizar o sinal gerado pelo microfone com o sinal compreendido pela placa de aquisição A/D, o sinal do microfone passou por duas etapas distintas, a primeira constituída de um pré-amplificador e a segunda de um banco de filtros passa-faixa, que transforma o sinal alternado gerado pelo microfone, já amplificado pelo pré-amplificador, em três sinais com amplitudes independentes, cada um com uma faixa de frequência específica.

Deste modo foram gerados quatro sinais independentes, um proveniente do transdutor de pressão e os outros três provenientes do ruído captado pelo microfone. Esses sinais são de natureza analógica, sendo então necessária a utilização de um multiplexador e de um conversor analógico-digital em conjunto com o micro-computador. O multiplexador possibilita ao microcomputador ter acesso aos sinais alternadamente, enquanto o conversor discretiza estes sinais e os transforma em números binários.

Um programa de aquisição de dados foi escrito em linguagem C de modo a controlar a placa de aquisição A/D, mostrar na tela do micro os dados coletados em função do tempo. Além disso, o programa desenvolvido armazena os dados amostrados em arquivos possibilitando um estudo mais detalhado da variação da pressão e das amplitudes geradas pelo ruído provocado pelo vazamento.

### ***3.1 - Especificação dos equipamentos***

#### **3.1.1 – Transdutor de pressão**

O transdutor é um aparelho capaz de transformar uma quantidade física como pressão em voltagem ou corrente elétrica equivalente, tendo como objetivo medir e transmitir a forma de energia primária.

Existem alguns tipos de materiais sólidos como o titanato de bário e o zirconato de chumbo que, ao serem deformados, geram uma carga elétrica. Esse efeito é reversível, e é chamado de efeito piezoelétrico.

O transdutor de pressão utilizado neste trabalho é do tipo piezoelétrico e tem a capacidade de gerar uma diferença de potencial, entre os eletrodos conectados a esse material, proporcional à deformação sofrida. A mudança de pressão deforma este material e a diferença de potencial gerada passa por um amplificador que amplifica esse sinal, na faixa de 1 a 5Volts, e o envia até o microcomputador.

O transdutor de pressão utilizado é da marca COLE PARMER modelo K1, capaz de realizar leituras de até 300 psig (20 kgf/cm<sup>2</sup>), com precisão de  $\pm 0,4$  psig.

### 3.1.2 – Microfone

O microfone é um dispositivo eletromecânico utilizado para converter o som em energia elétrica. Existem basicamente dois princípios de funcionamento: o dinâmico e o capacitivo.

Os microfones do tipo dinâmico utilizam um diafragma fino acoplado a uma bobina imersa num forte campo elétrico. Quando o som atinge o diafragma, esse começa a vibrar fazendo a bobina se mover dentro do campo magnético fixo gerando tensão nos terminais da bobina, que é proporcional à pressão do ar no diafragma.

Os microfones do tipo capacitivo consistem numa placa fixada próxima ao diafragma, como podemos ver na Figura 3.4. Entre a placa e o diafragma, é mantida uma carga elétrica polarizada, de forma que quando o diafragma se move, sob a influência das ondas sonoras, a diferença de potencial entre ele e a placa varia da mesma forma.

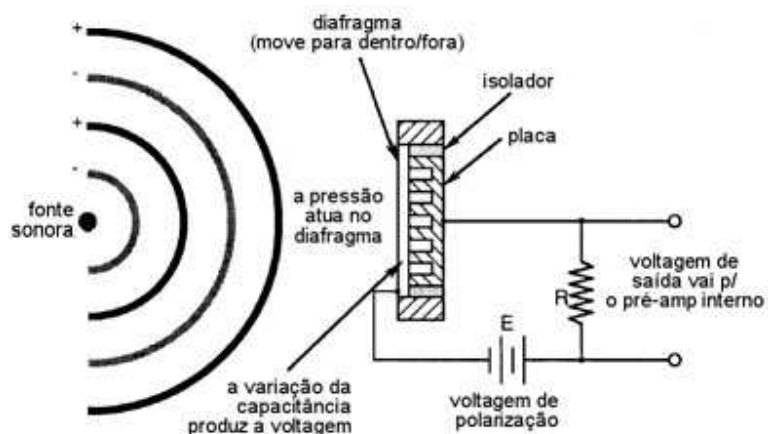


Figura 3.4 – Microfone capacitivo

O microfone utilizado neste trabalho é o microfone de eletreto. Ele utiliza o mesmo princípio do microfone capacitivo, mas sua cápsula recebe uma carga polarizadora permanente na sua fabricação dispensando uma alimentação polarizadora externa. A variação da pressão sonora varia a distância entre o diafragma e a placa posterior, e com isso a capacitância. Embora esse tipo de microfone dispense a carga polarizadora, os microfones de eletreto

apresentam uma altíssima impedância e, para serem utilizáveis, precisam ser dotados de um circuito conversor de impedância que requer uma alimentação externa para funcionar.

A capacidade de resposta de um microfone é determinada submetendo-se o aparelho a várias frequências de som de mesma intensidade e registrando-se a saída elétrica resultante. Na Figura 3.5 vemos o microfone modelo CZN-15E que foi utilizado neste trabalho e sua resposta em frequência (Figura 3.6).



Figura 3.5 - Foto Microfone CZN-15E

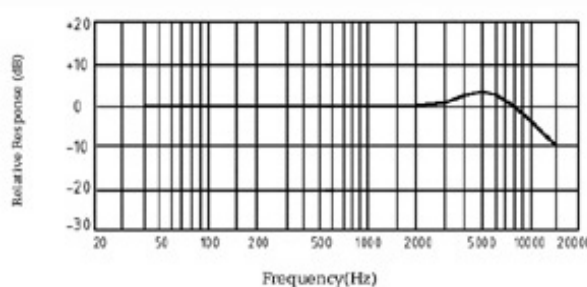


Figura 3.6 - Resposta em frequência

O microfone CZN-15E é omnidirecional, ou seja, existe pouquíssima distinção quanto à direção em que o som incide e, assim, o microfone responde igualmente aos sons vindos de todas as direções.

### 3.1.3 – Pré-Amplificador de Microfone

Todos os microfones capacitivos precisam de um pré-amplificador, localizado junto ao diafragma, para converter a alta impedância do elemento capacitivo variável a um valor adequadamente baixo para que o sinal possa ser facilmente transmitido a longa distância, sem perda significativa, através de um cabo.

Na montagem experimental, o pré-amplificador não fica próximo ao diafragma, isso porque o microfone fica localizado no interior do vaso, sob grande variação de pressão, o que poderia danificar o circuito. A solução encontrada foi deixar o pré-amplificador próximo ao vaso, utilizando um cabo blindado, para conectá-lo ao microfone.

O circuito elétrico desenvolvido é um pré-amplificador com três estágios (Figura 3.7).

No primeiro, é feita a conversão de impedância para garantir a máxima transferência de sinal do microfone para o pré-amplificador de tensão.

A conversão de impedância é feita utilizando uma tensão de alimentação de +12 Vdc em série com uma resistência de 10 k $\Omega$  alimentando, um transistor FET que fica localizado dentro da cápsula do microfone. Nesse ponto temos um sinal proveniente do microfone com uma impedância de saída de aproximadamente 10 K $\Omega$ . Esse sinal é alternado devido ao movimento do diafragma do microfone e apresenta também um nível DC proveniente da alimentação de 12 Vdc. Para retirar o nível DC, foi colocado um capacitor eletrolítico de 10 $\mu$ F em série com o microfone.

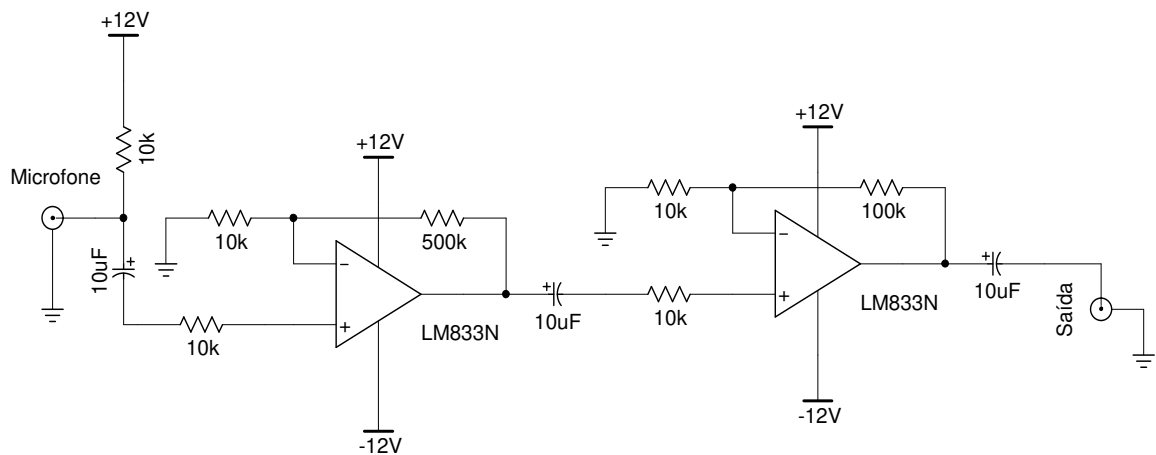


Figura 3.7 – Pré Amplificador de Microfone

Como o sinal alternado proveniente do microfone apresenta uma amplitude muito pequena, na ordem de 20 mVpp, foi necessária uma pré-amplificação de tensão para compatibilizar com o sinal compreendido pela placa de aquisição A/D que trabalha na faixa de 0 a 5 Volts.

O segundo e terceiro estágios têm a função de amplificar esse sinal. Para isso, foram utilizados dois amplificadores operacionais na configuração de amplificador não-inversor. O ganho (A) de cada estágio é dado pela equação:

$$A = \left( \frac{V_o}{V_i} \right) \quad (3.1)$$

Para o segundo estágio:

$$V_o = V_i * \left(1 + \frac{500}{10}\right) \rightarrow A = 51$$

Para o terceiro estágio:

$$V_o = V_i * \left(1 + \frac{100}{10}\right) \rightarrow A = 11 \quad (3.2)$$

Sabendo que a entrada do terceiro estágio é a saída do segundo, temos que o ganho total do sistema é:

$$V_o = V_i * \left(1 + \frac{500}{10}\right) * \left(1 + \frac{100}{10}\right) \rightarrow A = 561 \quad (3.3)$$

Foram utilizados dois estágios de amplificação, porque o amplificador operacional utilizado tem a característica de diminuir sua resposta em frequência com o aumento do ganho. Ou seja, ao invés de utilizar um amplificador com um ganho de aproximadamente 561, foram utilizados dois amplificadores, um com ganho de 51 e outro com ganho de 11. Assim tem-se uma resposta linear em toda a faixa de frequência.

A Figura 3.8 representa uma simulação realizada no programa CIRCUITMAKER, onde na entrada temos um sinal de baixa amplitude (20 mVpp) representando um microfone, e na saída, o mesmo sinal amplificado, com um ganho de 561.

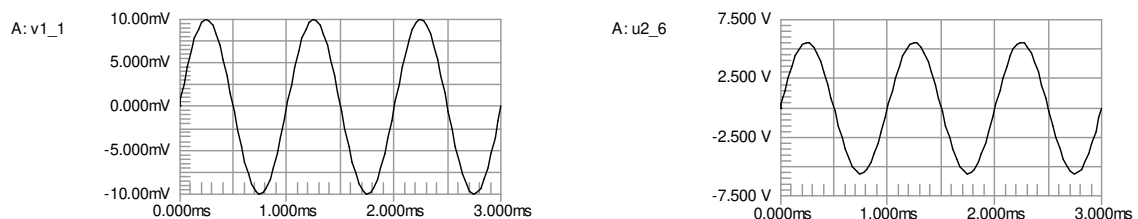


Figura 3.8 – Gráficos fornecidos pela simulação no programa CIRCUITMAKER

Com a ajuda do programa SCOPE, pode-se observar, através da Figura 3.9, o sinal gerado pelo ruído provocado por um vazamento num vaso de pressão, após passar pelo pré-amplificador de microfone. O programa foi ajustado para 1 Volt por divisão no eixo Y e 0,5ms por divisão no eixo X. O gráfico na Figura 3.9.(a) representa o ruído gerado utilizando um

orifício de 1mm de diâmetro a uma pressão inicial de 4 kgf/cm<sup>2</sup>. No gráfico da Figura 3.9.(b), foi utilizado um orifício de 2mm de diâmetro para a mesma pressão inicial.

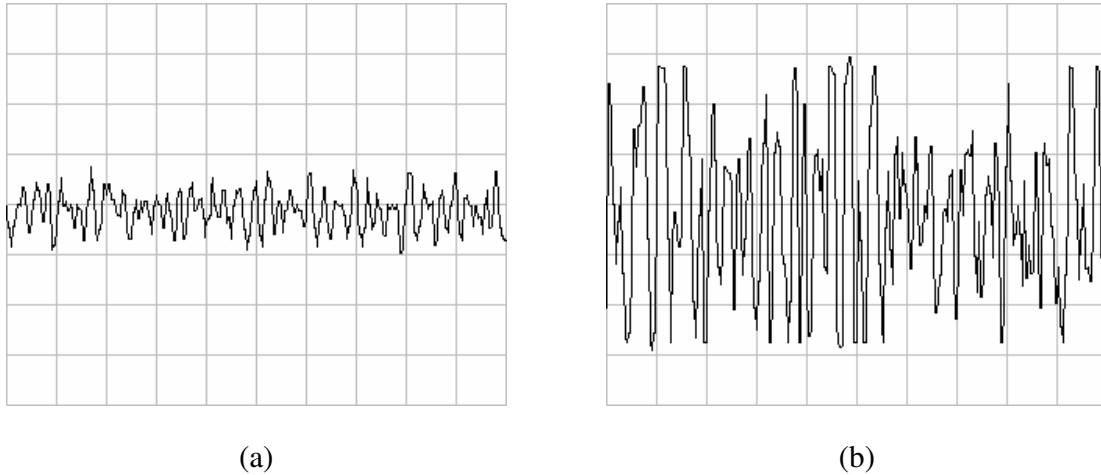


Figura 3.9 – Sinal de saída do pré-amplificador de microfone

A Figura 3.10 mostra o pré-amplificador do microfone, na montagem experimental.



Figura 3.10 – Vaso de pressão e pré-amplificador de microfone

### 3.1.4 – Banco de Filtros Passa-Faixa

Como visto na Figura 3.9, o sinal de saída do pré-amplificador de microfone varia em amplitude e em frequência, dependendo da pressão no interior do vaso e do diâmetro do orifício.

A placa de aquisição Analógico-Digital instalada no microcomputador possui uma taxa de amostragem de 2 kHz, ou seja, sinais com frequências acima de 1 kHz não são amostrados corretamente. Neste trabalho, o sinal amostrado é um sinal de áudio e sua frequência varia entre 20 Hz e 20 kHz ultrapassando a máxima frequência compreendida pela placa A/D. Além disso, a placa está configurada para compreender sinais positivos variando entre 0 e 5 Volts e o sinal de áudio é um sinal alternado apresentando valores positivos e negativos.

Portanto, é necessário compatibilizar novamente o sinal gerado pelo microfone com aquele compreendido pela placa de aquisição A/D. O circuito elétrico desenvolvido apresenta quatro estágios.

- 1º estágio: Filtro ativo Butterworth passa-baixo.
- 2º estágio: Controle de ganho
- 3º estágio: Banco de filtros ativos passa-faixa
- 4º estágio: Circuito retificador de meia onda

Para uma melhor apresentação, o circuito foi separado em quatro Figuras representando os estágios, e encontra-se de forma completa no Apêndice D.

### **1º Estágio: Filtro Ativo Butterworth Passa-Baixo**

No primeiro estágio, o sinal proveniente do pré-amplificador de microfone passa por um filtro ativo passa-baixo de segunda ordem (Figura 3.11). O filtro foi desenvolvido de forma a apresentar uma frequência de corte ( $f_c$ ) de 20kHz, compreendendo toda a faixa de áudio. Foi necessário utilizar esse tipo de filtro, pois o pré-amplificador de microfone, que fica localizado junto ao vaso, está cerca de 6 metros do computador e o cabo que interliga os dois circuitos, mesmo sendo blindado, funciona como uma antena captando ruídos e outras frequências indesejáveis.

O filtro Butterworth foi escolhido por apresentar uma resposta plana e igual ao valor máximo na faixa de passagem. O grau de planicidade na faixa de passagem aumenta à medida que a ordem do filtro aumenta, ou seja, quanto maior a ordem do filtro, maior a sua taxa de atenuação e a resposta do filtro se aproxima da resposta abrupta do filtro ideal.

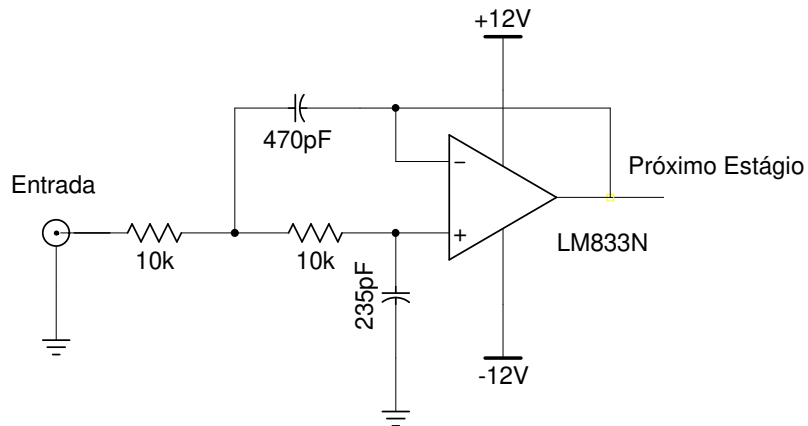


Figura 3.11 – 1º Estágio: Filtro Ativo Butterworth Passa-Baixo de segunda ordem.

Foi escolhido o filtro de segunda ordem por apresentar uma taxa de atenuação relativamente boa e pela sua simplicidade de montagem em relação aos filtros de maior ordem.

A Figura 3.12 representa a resposta em frequência do filtro ativo Butterworth passa-baixo de segunda ordem. A simulação foi realizada no programa CIRCUITMAKER, sendo que na entrada foi aplicado um sinal alternado de amplitude fixa de 2 Volts pico a pico e cuja frequência foi variada de 1 Hz à 10 MHz. O gráfico na Figura 3.12 representa o ganho em dB do circuito para as diferentes frequências na entrada.

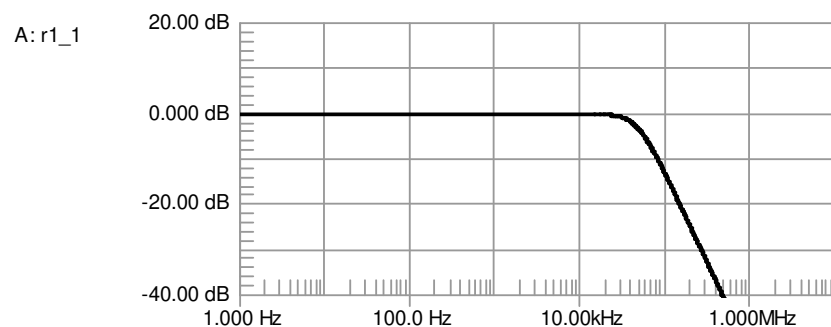


Figura 3.12 – Resposta em frequência do filtro ativo Butterworth passa-baixo de segunda ordem.

No gráfico acima, podemos observar que o ganho do filtro é linear e igual a 0dB até a frequência estipulada de 20 kHz. A partir dessa frequência o ganho diminui, sendo sua queda proporcional à ordem do filtro.

## 2º Estágio: Controle de Ganho

No segundo estágio, temos novamente um controle de ganho. Diferente do circuito do pré-amplificador, o ganho desse amplificador não é fixo, sendo controlado por um potenciômetro externo.

Esse controle de ganho foi utilizado para definir manualmente a amplitude do sinal que chega no computador, de modo que fosse possível a detecção do vazamento para todos os orifícios utilizados.

A Figura 3.13 representa o segundo estágio do circuito elétrico desenvolvido. É um amplificador operacional na configuração de amplificador não-inversor. O ganho (A) de cada estágio é dado pela equação (3.1).

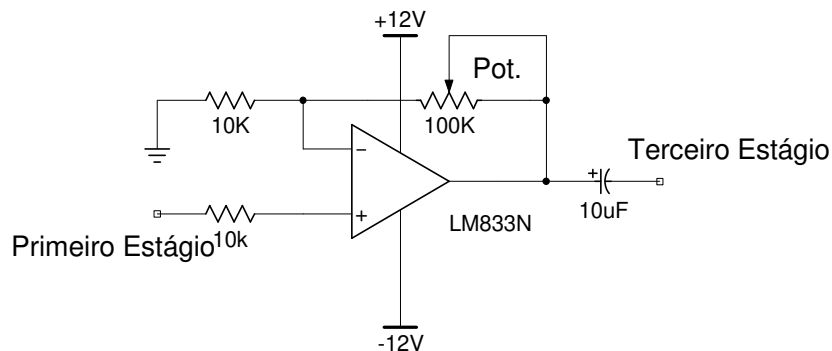


Figura 3.13 – Estágio 2: Amplificador Operacional

O potenciômetro utilizado varia de 0 a 100 kΩ e pode ser utilizado para manter ou para amplificar o sinal do primeiro estágio, onde o ganho (A) do amplificador varia de 1 a 11.

$$V_o = V_i * \left(1 + \frac{0}{10}\right) \rightarrow A = 1 \quad \text{e} \quad V_o = V_i * \left(1 + \frac{100}{10}\right) \rightarrow A = 11 \quad (3.4)$$

### **3º Estágio: Banco de filtros ativos passa-faixa**

O terceiro e o quarto estágios são os mais importantes, porque são os responsáveis por compatibilizar o sinal proveniente do microfone com o sinal compreendido pela placa A/D. Como vimos, a placa de aquisição não compreende sinais alternados maiores que 1kHz e os sinais de áudio superam em muito essa faixa.

Portanto, será necessário trabalhar com um sinal contínuo no tempo para garantir sua amostragem. O problema é que transformando um sinal alternado em um sinal contínuo, não é possível preservar sua característica de áudio. A solução encontrada foi separar as diversas frequências presentes em um sinal de áudio, gerando sinais independentes, cada um com uma faixa de frequência específica e depois transformar cada sinal em um sinal contínuo.

Para separar as frequências presentes num sinal de áudio foram utilizados filtros passa-faixa onde cada filtro apresenta uma faixa específica de frequência. O filtro apresenta ganho de aproximadamente 20 dB para a frequência estipulada e ganho negativo para todas as outras frequências. Cada sinal, agora, apresenta uma frequência específica e sua amplitude varia de acordo com a amplitude dessa frequência no sinal de áudio.

Inicialmente, foram construídos vários filtros passa-faixa projetados para frequências de 1 kHz, 3 kHz, 5 kHz, 7 kHz, 9 kHz, 11 kHz, 13 kHz, 15 kHz e 17 kHz. Para facilitar a análise da resposta em frequência do ruído gerado pelo vazamento, foram escolhidos os três filtros passa-faixa que melhor responderam ao sinal gerado. Foram escolhidos os filtros de 1kHz, 5 kHz e 9 kHz.

Os filtros passa-faixa desenvolvidos neste trabalho são conhecidos como filtros ativos biquadráticos com amplificadores simples (BASs), são versáteis e fáceis de ser projetados e ajustados (sintonizados) depois da montagem final. A Figura 3.14 representa os filtros ativos biquadráticos desenvolvidos.

A sintonia é feita através de potenciômetros onde podemos variar o valor da resistência e com isso ajustar manualmente o ganho e a frequência de ressonância de cada filtro. A resistência  $R5$  foi substituída por um potenciômetro de  $10k\Omega$  em todos os filtros. Através dele, ajustamos o ganho individual de cada filtro na frequência específica de modo a manter o mesmo ganho em todos os filtros. A resistência  $R4$  foi substituída por potenciômetros de

diferentes valores. Através deles, ajustamos a frequência específica de cada filtro, ou seja, a frequência em que temos o máximo ganho.

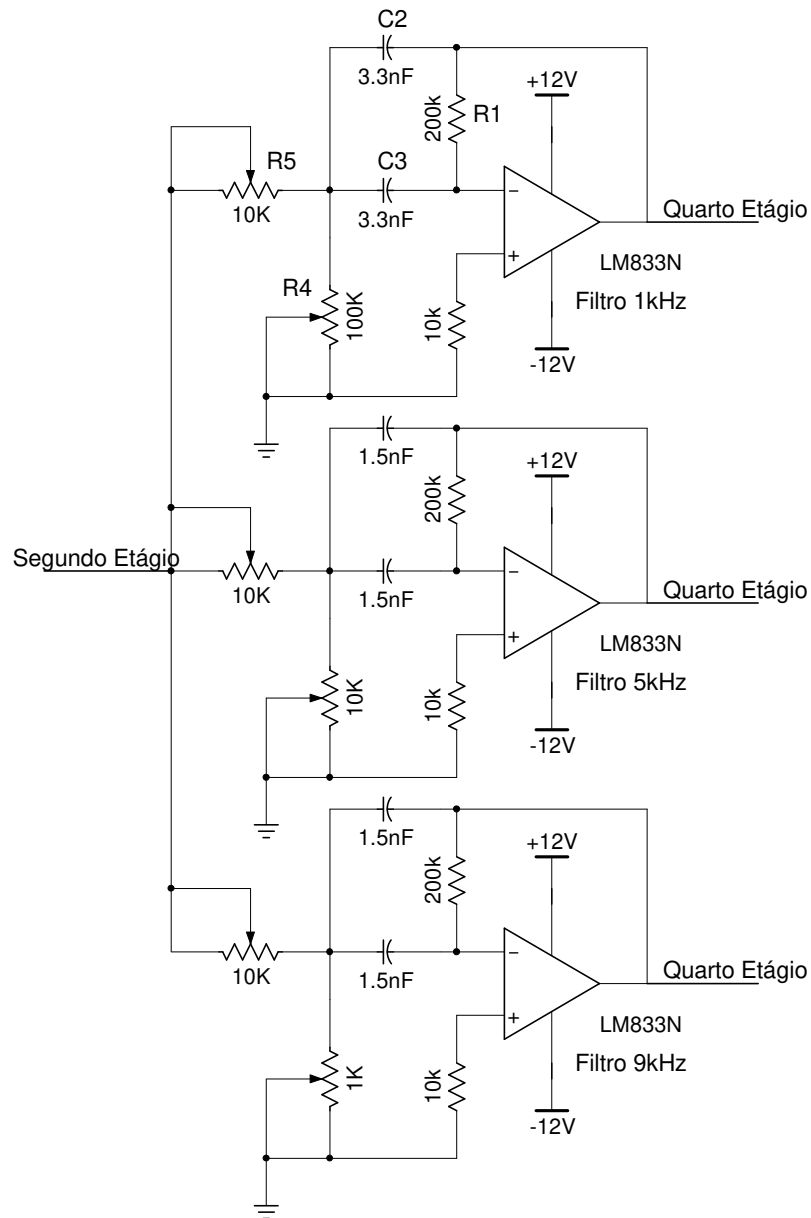


Figura 3.14 – 3º Estágio: Três Filtros Ativos Biquadráticos

O ganho ( $G_v$ ) e a frequência específica ( $f_0$ ) de cada filtro passa-faixa são definidos pelas equações:

$$f_0 = \frac{\sqrt{\frac{R_4 + R_5}{R_1 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot C_2 \cdot C_3}}}{2\pi} \quad (3.5)$$

$$G_v = \left( \frac{1}{C_2 \cdot R_5} \right) \left( \frac{R_1 \cdot C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3} \right) \quad (3.6)$$

Para o filtro de 1kHz:

$$f_0 = \frac{\sqrt{\frac{47 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{200 \cdot 10^3 \cdot 47 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 3,3 \cdot 10^{-9} \cdot 3,3 \cdot 10^{-9}}}}{2\pi} \rightarrow f_0 = 1,18 kHz \quad (3.7)$$

$$G_v = 20 \log \left( \frac{1}{3,3 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 10^3} \right) \left( \frac{200 \cdot 10^3 \cdot 3,3 \cdot 10^{-9} \cdot 3,3 \cdot 10^{-9}}{3,3 \cdot 10^{-9} + 3,3 \cdot 10^{-9}} \right) \rightarrow G_v = 20 dB \quad (3.8)$$

Para o filtro de 5kHz:

$$f_0 = \frac{\sqrt{\frac{3 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{200 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 \cdot 10^{-9}}}}{2\pi} \rightarrow f_0 = 4,94 kHz \quad (3.9)$$

$$G_v = 20 \log \left( \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 10^3} \right) \left( \frac{200 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 \cdot 10^{-9}}{1,5 \cdot 10^{-9} + 1,5 \cdot 10^{-9}} \right) \rightarrow G_v = 20 dB \quad (3.10)$$

Para o filtro de 9kHz:

$$f_0 = \frac{\sqrt{\frac{0,75 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{200 \cdot 10^3 \cdot 0,75 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 \cdot 10^{-9}}}}{2\pi} \rightarrow f_0 = 8,98 kHz \quad (3.11)$$

$$G_v = 20 \log \left( \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 10^3} \right) \left( \frac{200 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 \cdot 10^{-9}}{1,5 \cdot 10^{-9} + 1,5 \cdot 10^{-9}} \right) \rightarrow G_v = 20 dB \quad (3.12)$$

A Figura 3.15 mostra a resposta real em frequência, dos três filtros ativos passa-faixa desenvolvidos. O ensaio foi realizado com a ajuda de um osciloscópio digital e de um gerador de sinais configurado para gerar ondas senoidais com amplitude fixa em 0,5 Volts de pico e frequências de 10 Hz a 14 kHz.

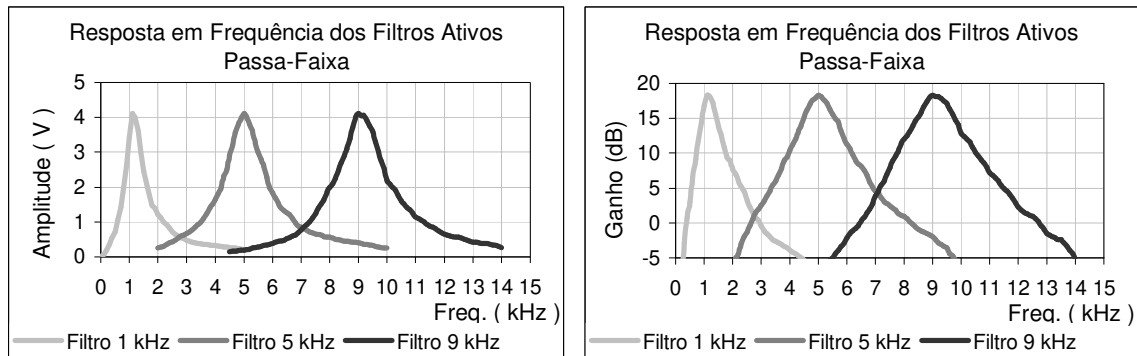


Figura 3.15 – Resposta em frequência dos filtros ativos passa-faixa

#### 4º Estágio: Circuito retificador de meia onda

O sinal na saída de cada filtro passa-faixa ainda é um sinal alternado, ou seja, ele precisa ser transformado em um sinal contínuo no tempo para que a placa de aquisição A/D possa compreendê-lo. Essa transformação é feita utilizando-se de um circuito retificador de meia onda na saída de cada filtro. O circuito retificador de meia onda é formado por um diodo em série com um capacitor eletrolítico.

Uma das características importantes do diodo é que ele se comporta como um curto circuito quando diretamente polarizado e como um circuito aberto quando inversamente polarizado. Por isso, durante o semiciclo positivo da onda senoidal o diodo conduz e a tensão de saída é praticamente igual à tensão de entrada e, durante o semiciclo negativo, o diodo não conduz, logo a tensão na saída é igual a zero.

A Figura 3.16 representa um circuito retificador formado por um diodo e uma resistência. É importante notar que o diodo apenas retifica a onda senoidal, deixando passar o semiciclo positivo. Após a retificação, é necessário transformar o sinal alternado em um sinal contínuo e, para isso, é utilizado um capacitor eletrolítico em série com o diodo.

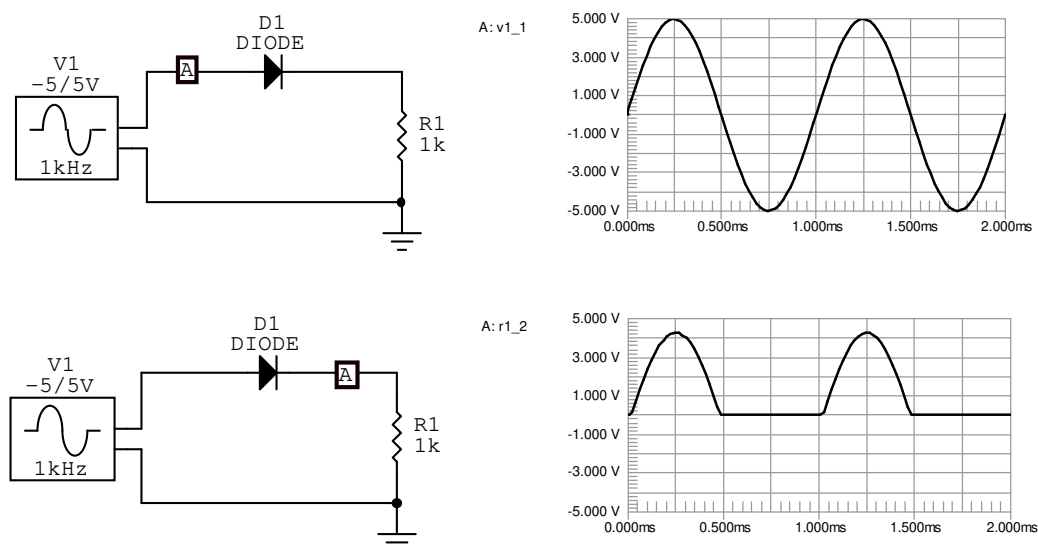


Figura 3.16 – Retificador de meia onda com uso de diodo e resistência

A Figura 3.17 representa um circuito retificador formado por um diodo e um capacitor. O capacitor eletrolítico tem a propriedade de armazenar energia e mantê-la por um certo tempo, ou seja, o capacitor carrega conforme a tensão em seu pólo positivo aumenta e, quando essa tensão começa a diminuir, o capacitor tenta mantê-la até o momento em que começa a se carregar novamente. Dependendo da capacitância do capacitor e da frequência em que ele novamente é carregado, a diferença de potencial em seus pólos torna-se constante, mantendo a máxima tensão à que foi submetido.

Portanto, entre o diodo e o capacitor temos uma tensão constante com a amplitude quase igual à amplitude de pico do sinal alternado. Essa queda de tensão é devida ao diodo que, dependendo do modelo, pode apresentar uma queda de tensão de 0,7 Volts.

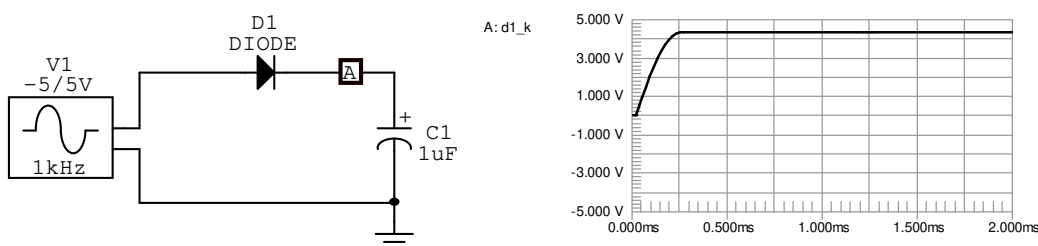


Figura 3.17 – Retificador de meia onda com uso de diodo e capacitor

A Figura 3.18 representa o retificador de meia onda utilizado na saída de cada filtro de frequência.

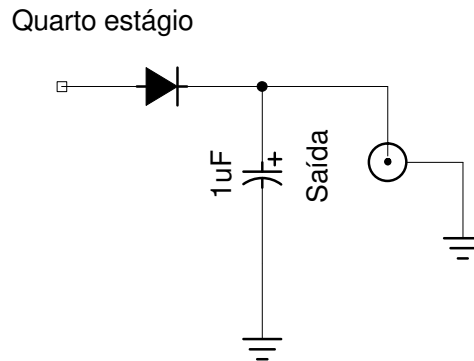


Figura 3.18 – 4º Estágio: Retificador de meia onda

### 3.1.5 – Placa Conversora Analógica-Digital-Analógica (ADA)

A placa conversora ADA é utilizada para realizar a conversão de sinais analógicos em digitais e vice-versa. Ela é composta por:

- Multiplexador
- Conversor analógico-digital (CAD) de 12 bits e 8 canais;
- Conversor digital-analógico (CDA) de 10 bits e 8 canais;
- Placa digital-digital (D/D) de 8 bits com 8 canais de entrada e 8 canais de saída;

A placa conversora utilizada neste trabalho é a placa ADA versão 2.2 da TAURUS ELETRÔNICA – Brasil e, para a conversão, foram utilizados apenas o multiplexador e o conversor analógico-digital.

#### **Multiplexador**

O multiplexador é um equipamento eletrônico com várias portas, ou canais de entrada, que permite um único conversor analógico-digital (CAD) ter acesso a varias linhas de sinais analógicos (Figura 3.19).

A utilização do multiplexador é de grande importância, pois como temos um transdutor de pressão e três sinais provenientes do microfone, ambos de natureza analógica, o

multiplexador evita a necessidade de termos 4 conversores instalados no computador. O multiplexador é parte integrante da placa ADA e possui 8 entradas analógicas.

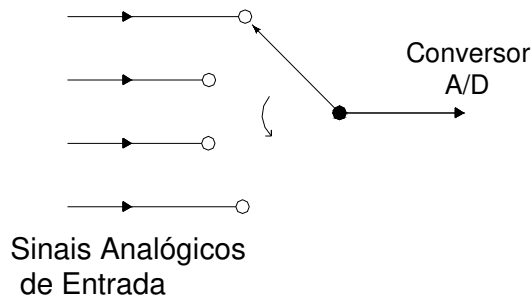


Figura 3.19 – Esquema representativo do multiplexador

### **Conversor analógico-digital (CAD)**

O conversor analógico-digital é constituído por um sampler e por uma placa conversora de sinais analógicos em digitais.

O sampler funciona como um interruptor permitindo a passagem da corrente elétrica em intervalos regulares de tempo, ou seja, sua função é distretizar o sinal analógico possibilitando sua leitura pelo microcomputador. Faz-se necessário, pois a placa conversora gasta um pequeno intervalo de tempo para transformar o sinal analógico em uma palavra digital de 12 bits.

A frequência com que o sampler discretiza o sinal analógico é conhecida como frequência de amostragem. A frequência de amostragem deve ser no mínimo duas vezes maior que a frequência do sinal a ser discretizado, de modo a preservar suas características ao longo do tempo (teorema de Nyquist). O sampler utilizado possui uma frequência de amostragem de 2 kHz, indicando que frequências acima de 1kHz na entrada não são amostradas corretamente (Figura 3.20).

Como o sinal discretizado ainda é um sinal elétrico de natureza analógica, ele não pode ser usado diretamente pelo computador que reconhece sinais de natureza digital. A placa

conversora analógica-digital transforma os sinais analógicos em palavras de 12 bits, ou seja, em números inteiros na forma binária.

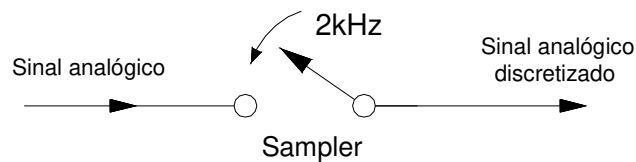


Figura 3.20 – Esquema representativo do funcionamento do sampler

A conversão do sinal analógico em digital será vista detalhadamente no Capítulo 4, que é referente ao sistema de aquisição de dados.

### 3.1.6- Microcomputador

O microcomputador usado na aquisição de dados em tempo real é um Pentium 233MHz, Winchester 500 MB, 16 MB RAM.

As principais tarefas realizadas pelo micro são:

- Receber os quatro sinais analógicos provenientes do transdutor de pressão e do microfone
- Arquivar esses dados em tempo real
- Mostrar os dados experimentais em forma de gráfico

É muito importante, para a aquisição de dados em tempo real, que se conheça o período de tempo gasto pelo microcomputador para receber os sinais analógicos, processá-los, arquivá-los e mostrá-los ao usuário. Como o micro utilizado possui relógio interno, é possível estimar, através do *software* desenvolvido, o tempo gasto entre duas aquisições, o que garante a interação entre o processo e o sistema de aquisição de dados.

## ***4- SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS***

O sistema de aquisição de dados pode ser definido como uma unidade constituída por quatro partes básicas: sensores/transdutores, condicionador de sinais, placa conversora Analógica – Digital – Analógica e o programa de aquisição de dados capaz de processar e gravar os dados obtidos.

Este capítulo tem como objetivo descrever o sistema de aquisição de dados desenvolvido para a detecção de um vazamento de gás num vaso de pressão. O sistema tem como principal função o monitoramento em tempo real dos dados fornecidos pelo microfone e pelo transdutor de pressão.

### ***4.1- Descrição do sistema de aquisição de dados***

Os seguintes instrumentos compõem o sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho:

#### **4.1.1- Sensores e transdutores:**

Os sensores e transdutores são os elementos que captam variações físicas e convertem-nas em sinais e impulsos elétricos. Transdutor é um termo usado para designar alguns tipos de sensores já dotados de um condicionador de sinais. Em um sistema de aquisição de dados a escolha dos sensores é um passo importante para a obtenção dos resultados com a precisão adequada.

Para medir a variação de pressão no interior do vaso, foi utilizado um transdutor de pressão e para medir os sinais de vibração e acústica foi utilizado um microfone.

#### **4.1.2- Condicionador de sinais:**

Os condicionadores de sinais são circuitos eletrônicos capazes de adequar os sinais analógicos para a conversão digital. Os principais sub-componentes dos condicionadores são

os amplificadores, filtros e isoladores.

Através dos amplificadores, o sinal analógico é amplificado para ajustar-se à faixa de entrada do conversor ADA e, quando necessário, o amplificador responsabiliza-se também pela alimentação dos sensores. Os filtros reduzem os ruídos do sinal analógico, diminuindo eventuais interferências que podem ser originadas por diversas fontes como radiofrequência, rede elétrica, aterramento, etc. Os isoladores, quando presentes, têm a função de proteger os outros módulos contra eventuais sobrecargas de tensão e corrente, as quais podem causar danos irreversíveis aos circuitos eletrônicos digitais.

O condicionador de sinais presente neste trabalho é formado por dois circuitos eletrônicos, o pré-amplificador de microfone e o circuito responsável pelos filtros passa-faixa, ambos utilizados para ajustar o sinal do microfone com o sinal compreendido pela placa de aquisição analógica-digital.

#### **4.1.3- Placa conversora analógica-digital-analógica (ADA):**

A placa conversora ADA é formada por um multiplexador e por um conversor analógico-digital-analógico. O multiplexador, como visto no Capítulo 3, é responsável por escolher qual o sinal a ser convertido e transmitido ao computador, pois a placa conversora possui oito entradas e apenas um conversor ADA, responsável por traduzir uma grandeza elétrica numa representação numérica adequada ao tratamento digital do sinal discretizado.

#### **4.1.4- Microcomputador:**

Responsável por processar, apresentar e arquivar os dados experimentais. O microcomputador faz a interface entre o programa de aquisição de dados e a placa conversora ADA.

#### **4.1.5- Programa de aquisição de dados:**

É o responsável por enviar instruções ao microcomputador e à placa conversora ADA, ou seja, pelo controle total do sistema, permitindo ao usuário comandar e monitorar o processo

de aquisição de dados. O programa de aquisição de dados desenvolvido armazena os sinais captados na forma de arquivos que podem ser consultados posteriormente.

#### **4.2- Conversão do sinal analógico em digital**

Como os sinais gerados pelo transdutor de pressão e pelo microfone presentes no sistema de aquisição de dados são de natureza analógica, é necessária uma conversão de analógico para digital para que esses sinais possam ser trabalhados no programa de aquisição de dados.

O conversor analógico-digital (CAD) de 12 bits foi configurado manualmente para trabalhar na faixa de 0 a 5 Volts, ou seja, para um sinal de 5 Volts na entrada do conversor, temos na saída um sinal digital de 12 bits com todos os bits em nível lógico alto, enquanto que, se tivermos 0 Volts na entrada, temos na saída um sinal digital de 12 bits, mas com todos os bits em nível lógico baixo, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Entrada e Saída do conversor A/D

| <b>Entrada (Volts)</b> | <b>Saída (sinal digital de 12 bits)</b> |
|------------------------|-----------------------------------------|
| 5                      | 111111111111                            |
| 0                      | 000000000000                            |

O sinal digital na saída do conversor é proporcional à amplitude do sinal na entrada. O programa desenvolvido em linguagem C trabalha com o sinal digital na forma de número decimal equivalente, ou seja, a programação é feita em número decimal equivalente ao sinal digital.

Para a conversão, devemos saber primeiro qual o número decimal equivalente ao máximo sinal digital ( $ND_{máximo}$ ) que é obtido através do número de bits do conversor AD, conforme a Equação 4.1:

$$ND_{máximo} = 2^{bits} - 1 \rightarrow ND_{máximo} = 2^{12} - 1 \rightarrow ND_{máximo} = 4095 \quad (4.1)$$

Para 5 Volts na entrada do conversor, temos na saída o número binário equivalente a 4095 e para 0 Volts na entrada, temos o número decimal equivalente a 0. A relação entre a tensão de entrada e o número decimal equivalente é linear conforme a relação abaixo:

$$\frac{ND}{4095} = \frac{SA}{5} \quad (4.2)$$

Após a conversão, o número decimal equivalente será transformado em unidades de tensão (Volts), para as três entradas relativas ao sinal do microfone e em unidades de pressão (kgf/cm<sup>2</sup>) para o sinal proveniente do transdutor de pressão. Essa conversão é feita na sub-rotina LEITURA no programa de aquisição de dados.

A amplitude dos sinais referentes ao microfone variam entre 0 e 5 Volts enquanto que a amplitude do sinal proveniente do transdutor de pressão varia entre 1 e 5 Volts. Isso implica que a conversão em unidades de tensão é realizada de forma diferente da conversão em unidades de pressão.

#### **4.2.1- Conversão do sinal analógico proveniente do microfone**

Para uma dada leitura em Volts na entrada do conversor, temos na saída o número decimal equivalente conforme Equação (4.2). Como a variação do sinal do microfone está entre 0 e 5 Volts, a equação de conversão de número decimal equivalente para o valor em Volts é feita no sentido inverso.

$$A = 5 \cdot \left( \frac{ND_{eq.}}{4095} \right) \quad (4.3)$$

onde: A é a amplitude de cada filtro de frequência e ND<sub>eq.</sub> o número decimal equivalente à tensão de entrada.

#### **4.2.2- Conversão do sinal analógico proveniente do transdutor de pressão**

Para uma dada leitura em Volts na entrada do conversor, temos na saída o número decimal equivalente conforme equação 4.2. Como a variação do sinal do transdutor de pressão

está entre 1 e 5 Volts, 1 Volt para a pressão de 0 kgf/cm<sup>2</sup> e 5 Volts para a pressão de 20kgf/cm<sup>2</sup>, deve-se mudar a referência do sinal de 0 para 1 Volt.

Através da Equação (4.2), encontramos o número decimal equivalente a 1 Volt.

$$ND_{eq.} = \frac{1}{5} \cdot 4095 = 819 \quad (4.4)$$

Assim, subtraindo o número decimal equivalente a 1 Volt do número decimal equivalente à tensão de entrada e tendo em vista a máxima leitura do transdutor de pressão, encontra-se a relação abaixo:

$$P = 20 \cdot \left( \frac{ND_{eq.} - 819}{4095 - 819} \right) \quad (4.5)$$

onde: P é a pressão em kgf/cm<sup>2</sup> e ND<sub>eq.</sub>, o número decimal equivalente à tensão de entrada.

### ***4.3- Temporização do programa de aquisição***

Uma das tarefas mais importantes de um programa de aquisição de dados em tempo real é determinar o intervalo de tempo gasto pelo computador para efetuar um laço de leitura. O laço de leitura no programa de aquisição de dados compreende as tarefas de leitura, conversão dos sinais analógicos em número decimal equivalente, filtragem através da média aritmética, transformação dos sinais em unidades de pressão e tensão e armazenamento desses dados num arquivo.

A temporização é feita utilizando o relógio interno do microcomputador, através da subrotina *clock()* e da biblioteca *time.h* da linguagem C no programa principal. Com a subrotina *clock()*, é possível saber o exato instante em que a subrotina leitura termina.

O intervalo de tempo é calculado da seguinte maneira: Ao iniciar a aquisição de dados, o valor do *clock()* é passado para uma variável denominada *tempo1*. Essa variável é mantida inalterada durante toda a execução do programa. Após a realização das tarefas realizadas na

subrotina leitura, o valor do *clock()* é passado para uma outra variável denominada *tempo2*. A diferença entre *tempo1* e *tempo2* corresponde ao tempo gasto pelo microcomputador para realizar a leitura.

#### **4.4- Filtragem dos dados**

Durante o processo de aquisição de dados, ruídos podem ser gerados por várias fontes como instrumentação utilizada, equipamentos elétricos, distância entre a instrumentação e a placa de aquisição AD, ou por uma variação qualquer no processo. Para que seja possível identificar corretamente um vazamento, torna-se necessário reduzir ao máximo esses ruídos, uma vez que podem ser confundidos com o próprio vazamento.

A redução de um ruído num processo de aquisição pode ser feita através de uma filtragem de dados. A seguir, serão mostrados os dois tipos de filtros utilizados neste trabalho: filtro analógico e filtro por média aritmética.

##### **Filtros Analógicos**

Filtros analógicos são circuitos elétricos cuja resposta em frequência, relativa ao ganho de tensão, tem valores significativos em faixas especificadas de frequência. As faixas de frequência em que o ganho do filtro é elevado são chamadas faixas de passagem e são elas que caracterizam os diversos tipos de filtros. Os tipos de filtros mais comuns são: passa-alta, passa-baixa, passa-faixa e rejeita-faixa.

Neste trabalho, foram utilizados dois tipos de filtros analógicos, o filtro passa-baixa e o filtro passa-faixa, mas apenas o filtro passa-baixa foi utilizado com a intenção de redução de ruídos já que o filtro passa-faixa serviu na separação das frequências estabelecidas.

As frequências que delimitam a faixa de passagem são chamadas de frequências de corte. O filtro passa-baixa utilizado é o filtro ativo Butterworth de 2ª ordem cuja frequência de corte foi estabelecida em 20kHz, ou seja, frequências acima dessa faixa sofrem atenuação de 40dB/década, enquanto que frequências abaixo desta faixa não sofrem atenuação.

Com a ajuda do filtro passa-baixa, conseguiu-se a redução dos ruídos de alta frequência gerados através da linha de transmissão do sinal.

### **Filtro por média aritmética**

O filtro por média aritmética é feito através do cálculo da média de um determinado número de medidas consecutivas e considerá-las como o valor filtrado de uma determinada variável, para o intervalo de tempo consumido durante a medida.

O filtro por média aritmética foi implementado na subrotina leitura no programa de aquisição de dados. Foram realizadas 500 medidas consecutivas por entrada analógica do conversor. O valor médio das 500 medidas consecutivas foi considerado como a medida realizada num intervalo de tempo.

O filtro por média aritmética é considerado satisfatório para ruídos de baixa frequência e para mínimas variações em amplitude, considerando um sinal contínuo no tempo.

## ***4.5- Programa de aquisição de dados***

O programa de aquisição é o responsável por controlar a placa de aquisição, filtrar os dados, converter os valores em unidade de tensão e pressão, fornecer os dados em forma de arquivo e mostrar, *on-line*, os resultados em forma gráfica. O programa desenvolvido encontra-se no Apêndice F.

O programa de aquisição, elaborado em linguagem C, apresenta as seguintes tarefas:

1. Definição das variáveis de controle da placa de aquisição ADA.
2. Declaração das variáveis globais e sub-rotinas.
3. Limpeza de tela.
4. Tela de apresentação.
5. Escolha do nome e construção do arquivo de resultados.

6. Pressionar uma tecla para início da aquisição de dados.
7. Variável *tempo1* assume o valor do *clock()*.
8. Limpeza de tela.
9. Construção dos gráficos: amplitude versus número de pontos e pressão versus número de pontos.
10. Início do *loop* de leitura que compreende as tarefas:
  - Aquisição dos dados.
  - Filtragem por média aritmética.
  - Conversão dos dados lidos em sinais digitais e posteriormente em unidades de amplitude (Volts) e pressão ( $\text{kgf/cm}^2$ ).
  - Variável *tempo2* assume o valor do *clock()*.
  - Cálculo do tempo de aquisição por ponto, subtraindo o valor das variáveis *tempo2* de *tempo1*.
  - Gravação do arquivo de resultados.
  - Impressão na tela do micro dos três valores obtidos em amplitude e do valor obtido em pressão.
  - Apertar uma tecla para sair do *loop* de leitura.
  - Voltar ao início do *loop* de leitura.
11. Limpeza de tela.
12. Fim do programa de aquisição de dados.

#### ***4.6- Procedimento experimental***

O procedimento experimental foi dividido em duas fases, sendo que na primeira foi realizado o ensaio para o vaso de pressão sem alimentação contínua e, na segunda, foi realizado um ensaio para o vaso com alimentação contínua.

As etapas do procedimento experimental foram:

#### **Vaso sem alimentação contínua**

1. Instalação do orifício que controla a magnitude do vazamento.
2. O vaso é preenchido com ar comprimido a uma determinada pressão. A pressão foi variada de 4 a 7 kgf/cm<sup>2</sup>.
3. A válvula de alimentação é mantida fechada durante todo o experimento.
4. O programa de aquisição é inicializado e é escolhido o nome para o arquivo de resultados.
5. O vazamento é provocado manualmente.
6. O tempo do experimento é suficiente para que o vaso se esvazie por completo.
7. O programa de aquisição é finalizado.

#### **Vaso com alimentação contínua**

1. Instalação do orifício que controla a magnitude do vazamento
2. O vaso é preenchido com ar comprimido a uma determinada pressão. Cada experimento tem um valor fixo de pressão, na faixa entre 4 e 7 kgf/cm<sup>2</sup>.
3. A válvula de alimentação é mantida aberta durante todo o experimento.
4. O programa de aquisição é inicializado e é dado o nome do arquivo de resultados.
5. O vazamento é provocado manualmente.
6. O tempo do experimento é suficiente para que o vaso volte a manter a pressão constante após a queda de pressão relativa à abertura da válvula.
7. O programa de aquisição é finalizado.

## 5 - RESULTADOS E ANÁLISE

### 5.1- Detecção de vazamento para o vaso sem alimentação contínua

A seguir são apresentados e analisados os transientes de pressão e as variações em amplitude do ruído sonoro gerado pelo vazamento para o vaso sem alimentação contínua. As Figuras 5.1 a 5.9 mostram a variação da pressão interna do vaso juntamente com as amplitudes do ruído sonoro provocados por um vazamento utilizando orifícios de 0,1mm; 0,4mm; 0,8mm; 1mm; 1,1mm; 1,5mm; 2,0mm; 3,2mm e 4,0mm, para pressões iniciais de 4 kgf/cm<sup>2</sup> e 7 kgf/cm<sup>2</sup>. Os demais gráficos estão apresentados no **Apêndice A**.

O tempo de duração de cada experimento foi suficiente para que o sistema readquirisse o estado estacionário através do esvaziamento total do vaso. A média aritmética no programa de aquisição de dados foi mantida em 500 aquisições por ponto em todos os experimentos.

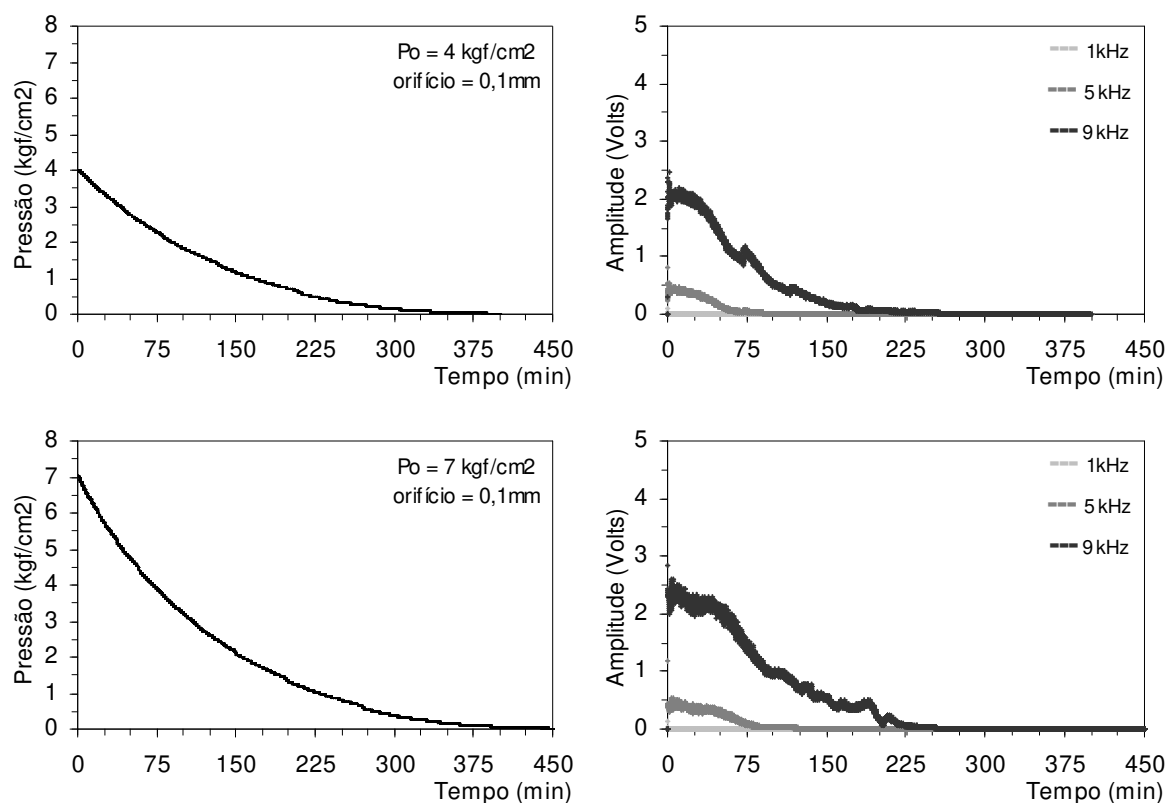


Figura 5.1 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,1mm).

As Figuras 5.1 a 5.9 mostram que a partir do instante em que o vazamento é provocado, a pressão no interior do vaso cai continuamente até que este se esvazie por completo. A velocidade da queda de pressão aumenta com o diâmetro do orifício utilizado. Para o orifício de 0,1mm, o tempo em que o vaso se esvazia fica entre 390 min. e 450 min., quando a pressão inicial varia entre 4 kgf/cm<sup>2</sup> e 7 kgf/cm<sup>2</sup>, enquanto que para a mesma faixa de pressão e utilizando um orifício de 4,0 mm, o tempo fica entre 35 s e 45 s.

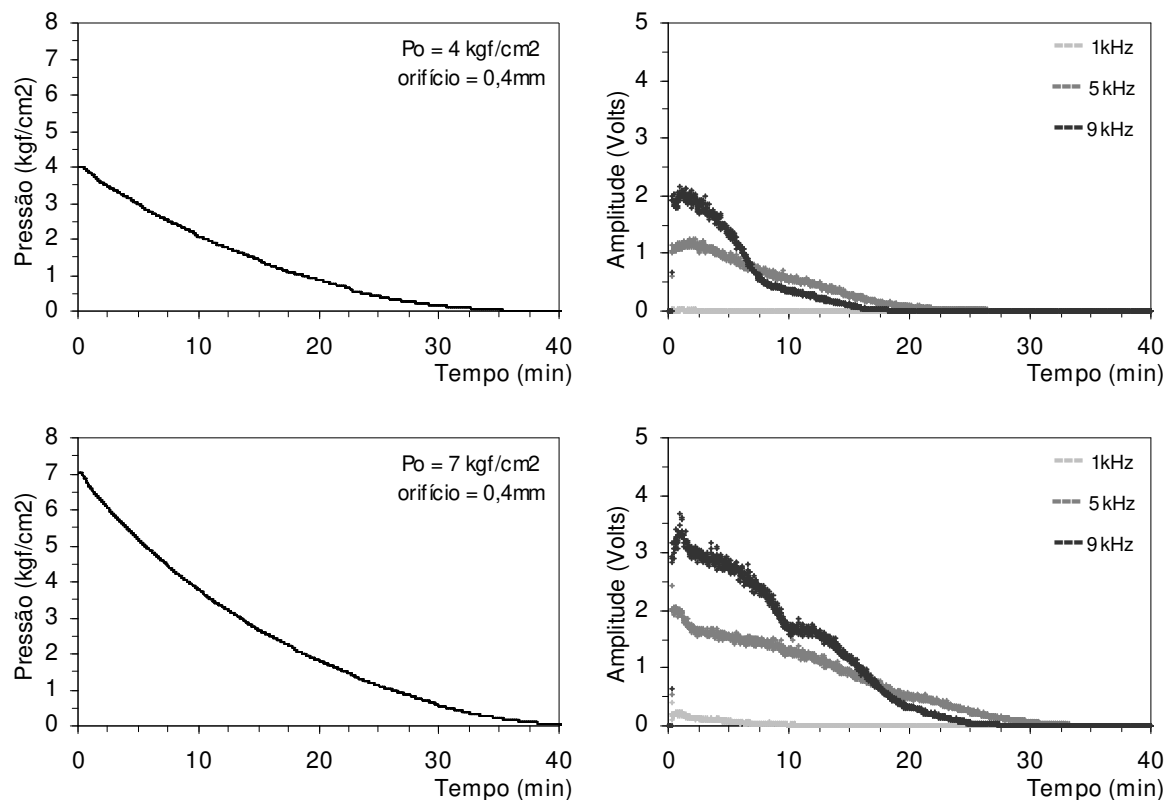


Figura 5.2 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,4mm).

No instante em que o vazamento é provocado, um ruído sonoro é gerado. Esse ruído é formado por um conjunto de frequências com diferentes amplitudes. Para a detecção foram separadas, através de um filtro analógico, três frequências distintas na ordem de 1 kHz, 5 kHz e 9 kHz. Estas frequências foram escolhidas pois apresentaram maior variação em amplitude.

O programa de aquisição desenvolvido mostra a variação de pressão no interior do vaso simultaneamente com a variação em amplitude das três frequências dominantes em função do tempo.

A Figura 5.2 mostra que as amplitudes das frequências geradas aumentam com a pressão interna do vaso. Ou seja, para o mesmo orifício e uma pressão inicial de 4 kgf/cm<sup>2</sup> a amplitude da frequência dominante chega a 2 Volts enquanto que para uma pressão inicial de 7 kgf/cm<sup>2</sup> a amplitude da frequência dominante chega a 3,5 Volts.

O aumento no diâmetro do orifício também aumenta a amplitude do ruído gerado. De modo a compatibilizar o sinal gerado pelo microfone com o compreendido pela placa de aquisição ADA, o ganho do circuito banco de filtros passa faixa precisou ser alterado conforme o orifício utilizado.

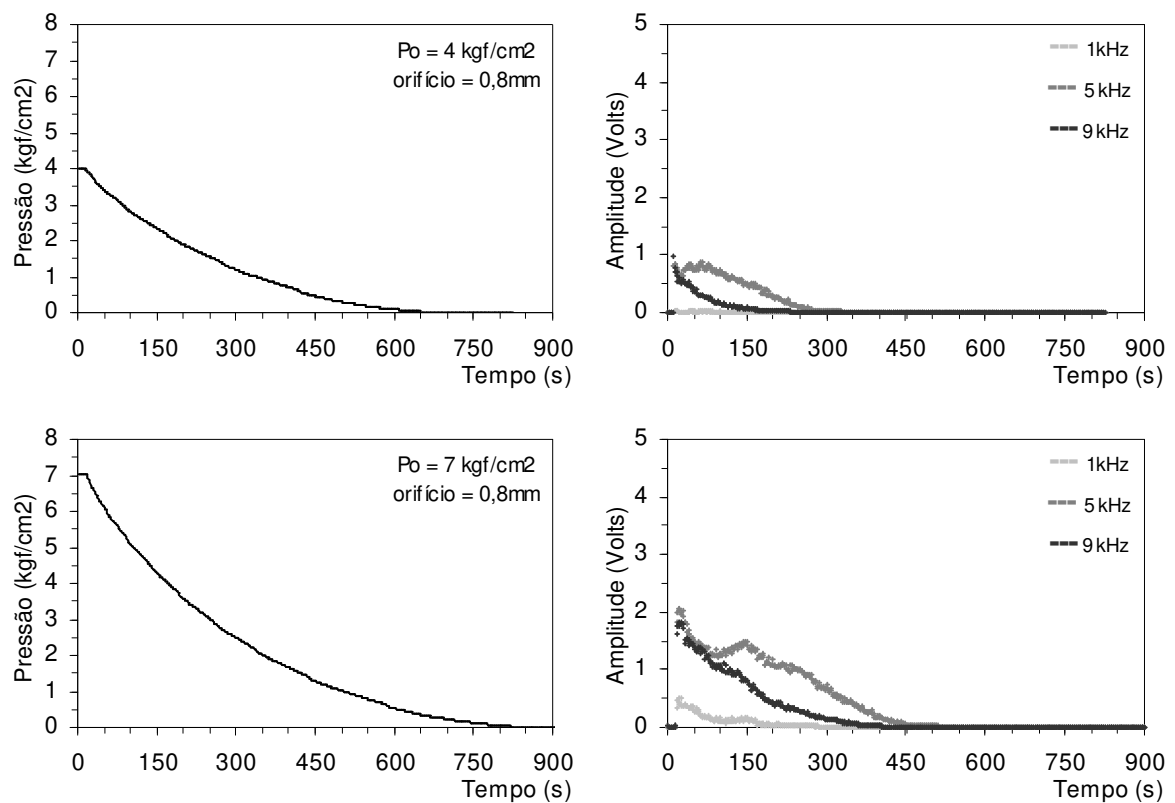


Figura 5.3 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,8mm).

Inicialmente, o ganho foi mantido fixo em 1 para as experiências realizadas com orifícios de 0,8mm; 1,0mm; 1,1mm; 1,5mm; 2,0mm; 3,2mm e 4,0mm. Pode-se observar nas Figuras 5.3 a 5.9 o aumento das amplitudes em função do aumento do orifício para o mesmo ganho.

Para o orifício de 0,4mm, a amplitude do ruído sonoro ficou muito pequena para ser compreendida pela placa de aquisição. Foi necessário aumentar em 4 vezes o ganho no circuito banco de filtros passa faixa para possibilitar uma leitura correta do sinal.

A mesma necessidade ocorreu para o orifício de 0,1mm cuja amplitude do ruído sonoro também foi muito pequena para ser compreendida pela placa ADA. O ganho precisou ser aumentado em mais 4 vezes, gerando um ganho 8 vezes maior que o utilizado para o orifício de 0,8 mm.

Comparando as Figuras 5.3 e 5.4 observa-se claramente o aumento da amplitude do ruído sonoro com o aumento do diâmetro do orifício. Para a mesma pressão inicial de 7 kgf/cm<sup>2</sup>, a amplitude da frequência dominante não passa de 2,0 Volts na Figura 5.3 enquanto que na Figura 5.4, a amplitude chega à 3,0 Volts.

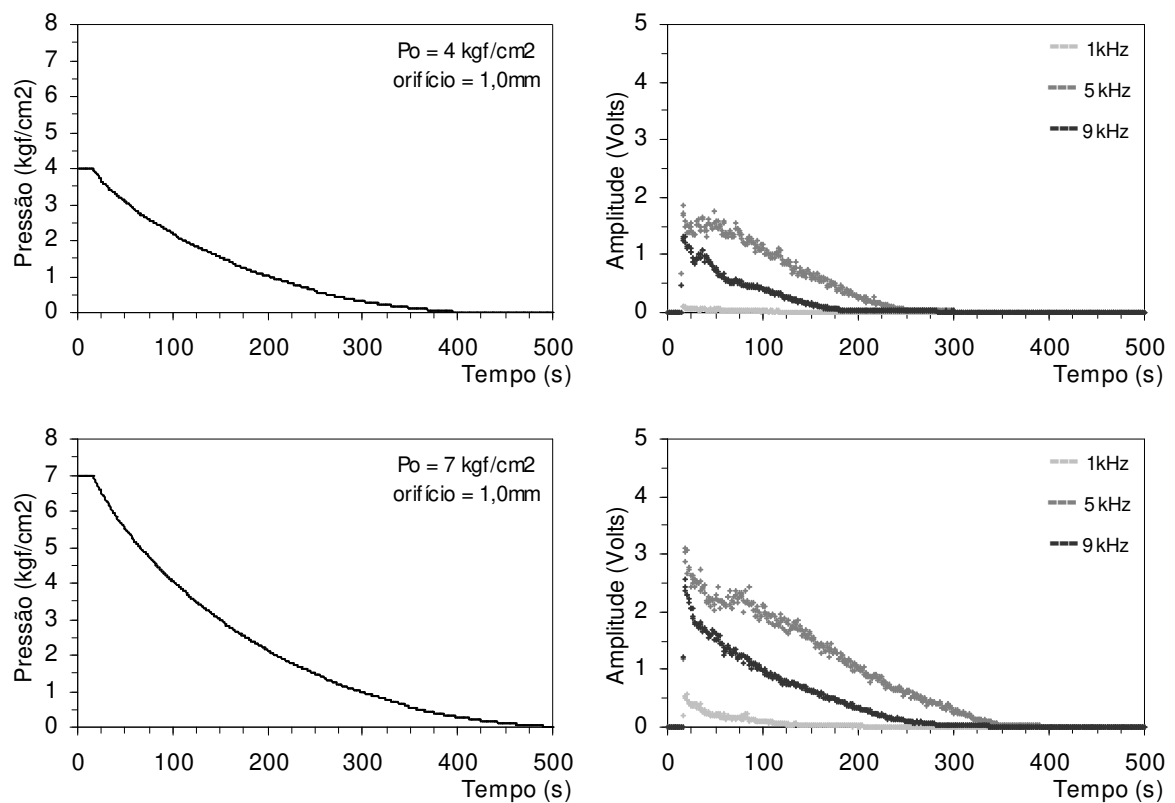


Figura 5.4 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,0mm).

Cada orifício apresenta uma resposta em frequência específica, que ocorre com a queda de pressão ao longo do tempo, ou seja, a maneira como essas amplitudes variam em função do tempo é específica e dependem exclusivamente do orifício utilizado.

Comparando as Figuras 5.4 e 5.5, tem-se que uma pequena mudança no diâmetro do orifício (0,1 mm), a variação das amplitudes das frequências em função do tempo foi alterada, mesmo não apresentando mudanças bruscas na amplitude máxima da frequência dominante.

Essa característica pode muito bem ser observada em todas as figuras, onde as amplitudes das três frequências aumentam com a pressão inicial do sistema, mas seu comportamento ao longo do tempo é exclusivo do orifício utilizado.

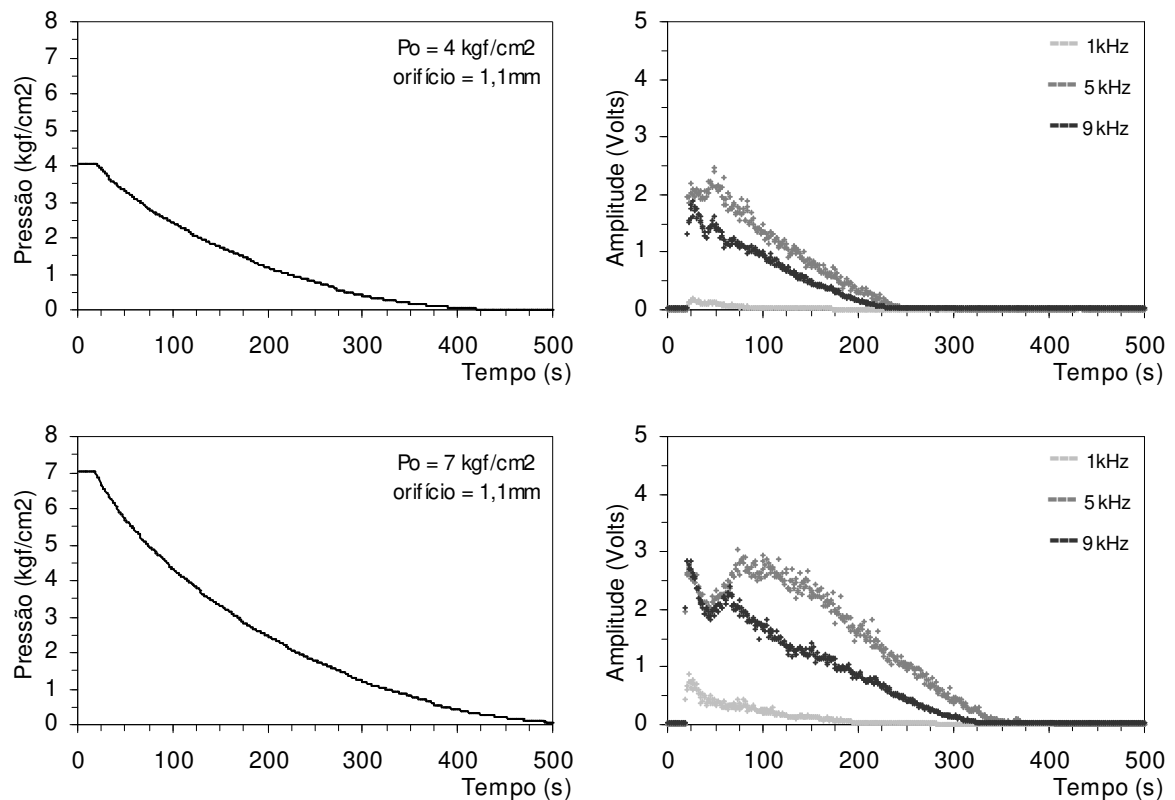


Figura 5.5 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,1mm).

O aumento do orifício provoca também uma alteração na frequência dominante do sistema. Quanto menor é a frequência, mais grave é o som e quanto maior é a frequência, mais

agudo é o som, ou seja, frequências abaixo de 1kHz apresentam sons mais graves enquanto que frequências acima de 9kHz apresentam sons mais agudos.

Observando a Figura 5.1 que corresponde ao orifício de 0,1 mm, tem-se que a amplitude da frequência de 9kHz supera em muito a amplitude da frequência de 5 kHz enquanto que a amplitude da frequência de 1 kHz não aparece, indicando um som predominantemente agudo.

A Figura 5.2 que corresponde ao orifício de 0,4 mm mostra uma inversão na frequência dominante. Inicialmente, a frequência de 9 kHz supera a de 5 kHz e passado algum tempo, a frequência de 5 kHz supera a de 9 kHz. Temos também a frequência de 1 kHz presente no sistema, mesmo que com baixa amplitude.

A partir da Figura 5.3 temos que a frequência predominante no sistema é a frequência de 5 kHz. Na figura 5.8, observa-se que a frequência de 1 kHz começa a superar a frequência de 9 kHz indicando um som predominantemente grave.

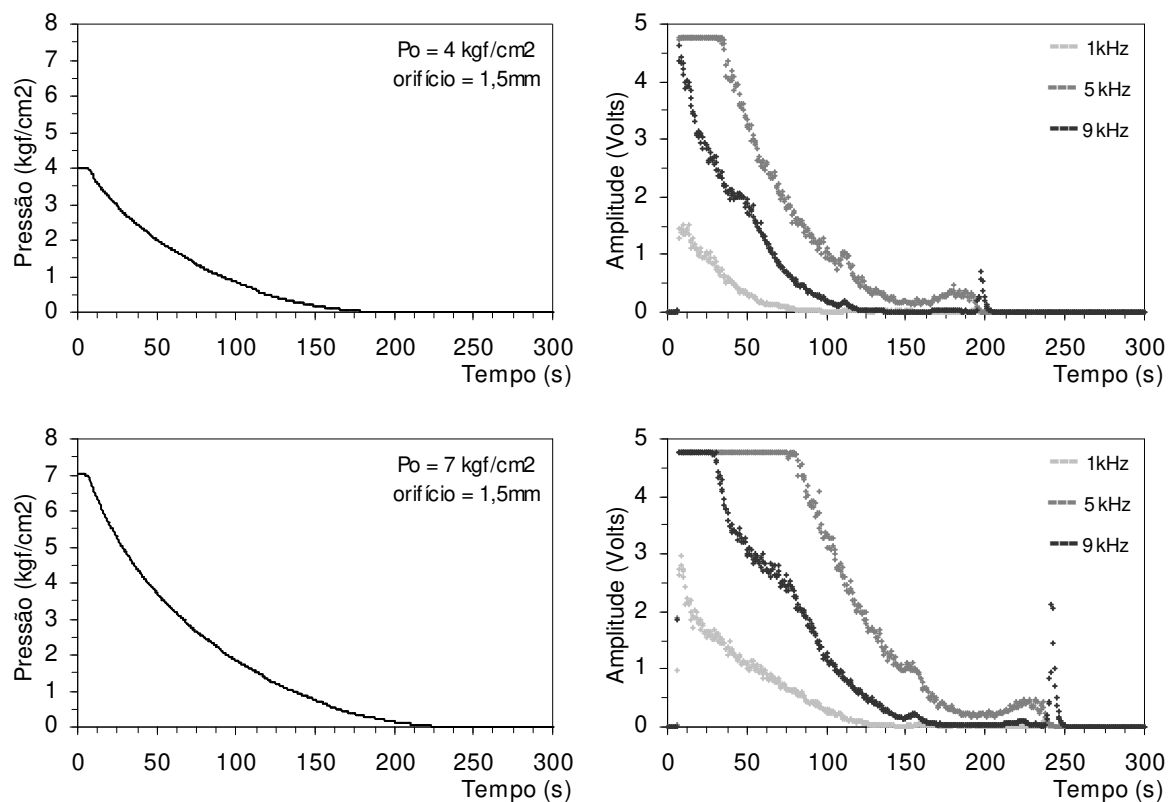


Figura 5.6 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,5mm).

Portanto, temos que para orifícios pequenos o ruído sonoro é mais agudo se comparado aos orifícios maiores cujo ruído sonoro é mais grave.

Podemos observar uma outra característica, que ocorre para vazamentos provocados por orifícios maiores que 1,5 mm, é o ruído gerado quando o vaso se esvazia por completo. É a ressonância do vaso quando sua pressão interna está quase se igualando com a pressão externa. Essa condição pode ser observada na Figura 5.6 onde o som gerado pelo vazamento fica mais agudo, ou seja, a frequência de 9 kHz supera a frequência de 5 kHz que até então era dominante.

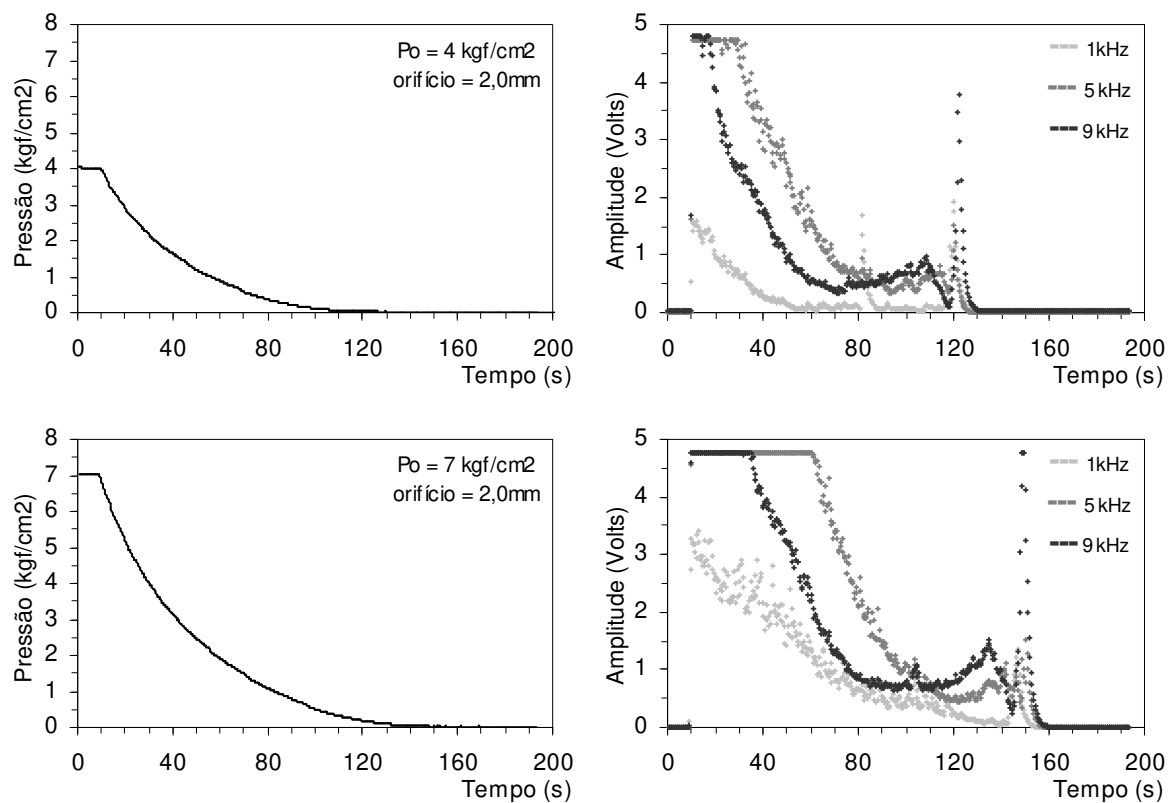


Figura 5.7 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 2,0mm).

Observa-se nas Figuras de 5.6 a 5.9 que a amplitude das frequências de 5 kHz e 9 kHz estão acima do valor máximo que a placa de aquisição A/D pode converter, que é de 4,75 V. Esse tipo de resposta ocorre porque foi ajustado o ganho do amplificador de microfone para detectar vazamentos utilizando orifícios de menor grandeza sendo que o ganho no amplificador de microfone foi mantido fixo para os orifícios de 0,8 mm a 4,0 mm.

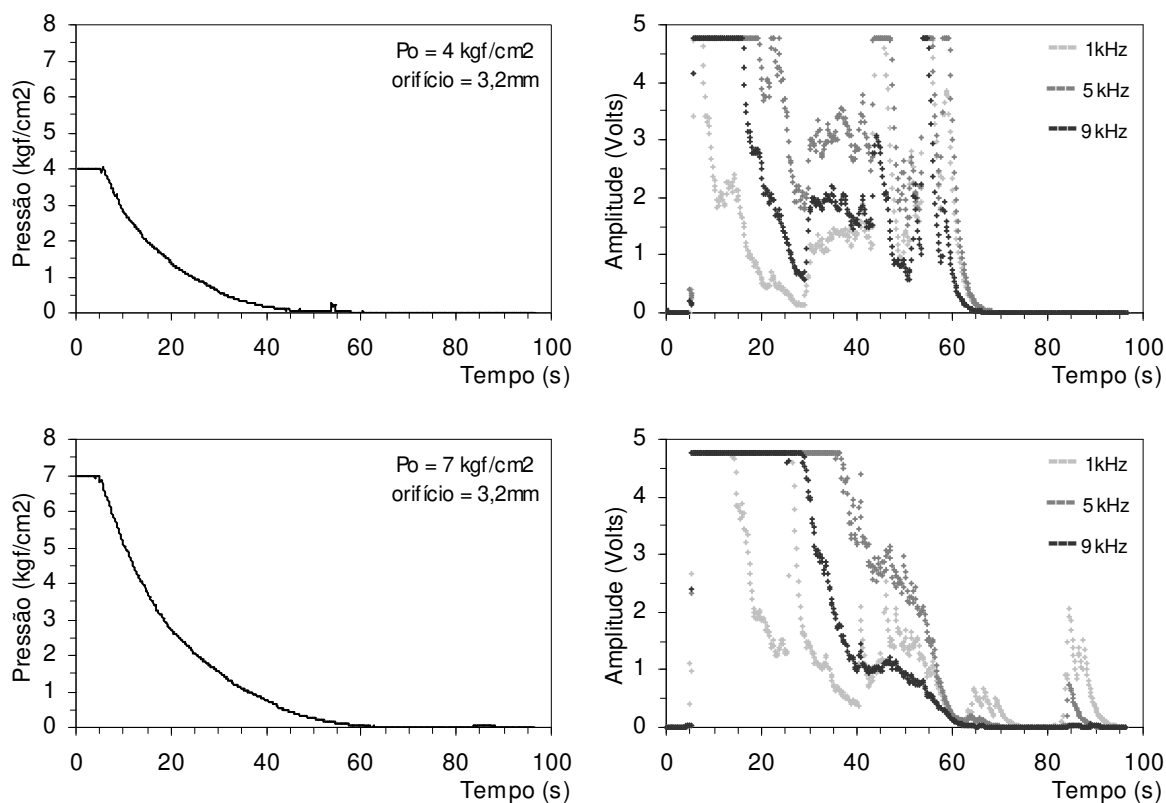


Figura 5.8 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 3,2mm).

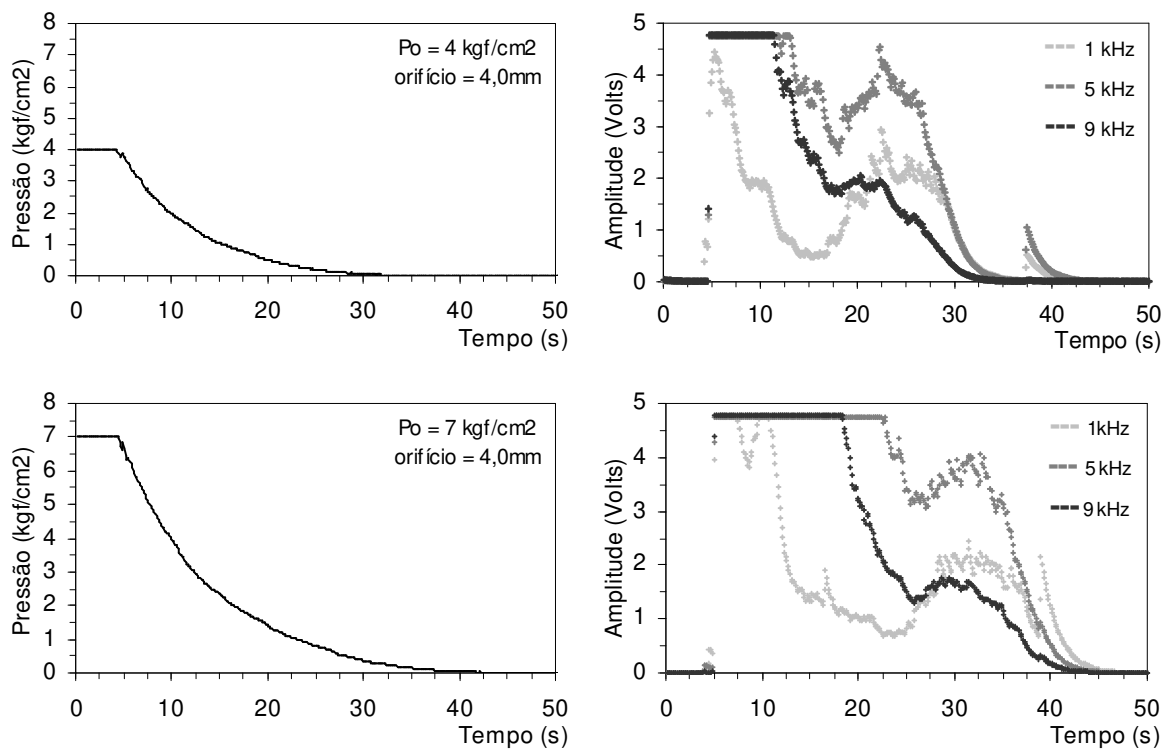


Figura 5.9 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 4,0mm).

## 5.2 Detecção de vazamento para o vaso com alimentação contínua

A seguir são apresentados e analisados os transientes de pressão e as variações em amplitude do ruído sonoro gerado pelo vazamento para o vaso com alimentação contínua. As figuras 5.10 a 5.18 mostram a variação da pressão interna do vaso juntamente com as amplitudes do ruído sonoro provocados por um vazamento utilizando orifícios de 0,1mm; 0,4mm; 0,8mm; 1mm; 1,1mm; 1,5mm; 2,0mm; 3,2mm e 4,0mm, para pressões iniciais de  $4\text{kgf/cm}^2$  e  $7\text{kgf/cm}^2$ . Os demais gráficos estão apresentados no **Apêndice B**.

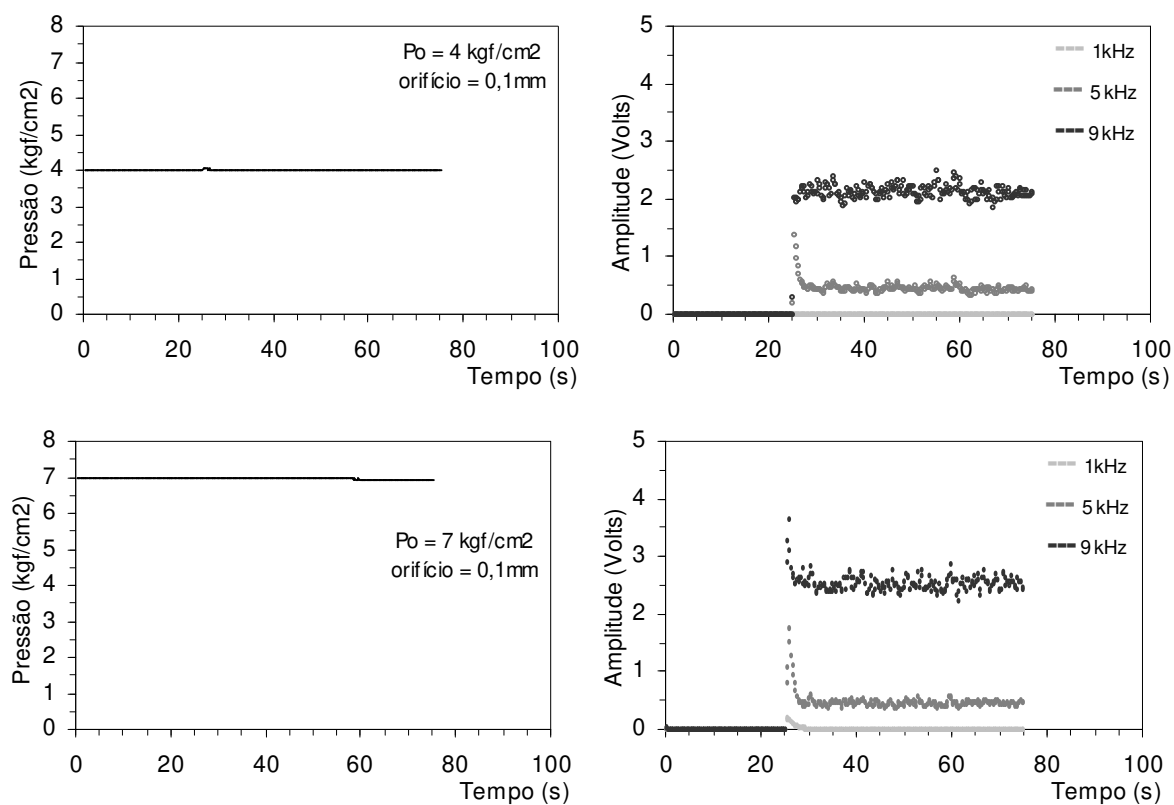


Figura 5.10 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,1mm).

O programa de aquisição desenvolvido mostrou a variação de pressão no interior do vaso simultaneamente com a variação em amplitude das três frequências dominantes em função do tempo. A média aritmética no programa de aquisição de dados foi mantida em 500 aquisições por ponto em todos os experimentos.

As Figuras 5.10 a 5.17 mostram que a ocorrência de vazamento no vaso gera apenas uma pequena variação na pressão interna, ao passo que a detecção do ruído sonoro gerado torna perfeitamente possível a detecção do vazamento. Quando o vazamento é provocado a pressão interna do vaso sofre uma redução, em alguns casos existe uma ligeira recuperação, e permanece constante. Por outro lado, a amplitude do ruído sonoro aumenta bruscamente, dependendo da frequência dominante.

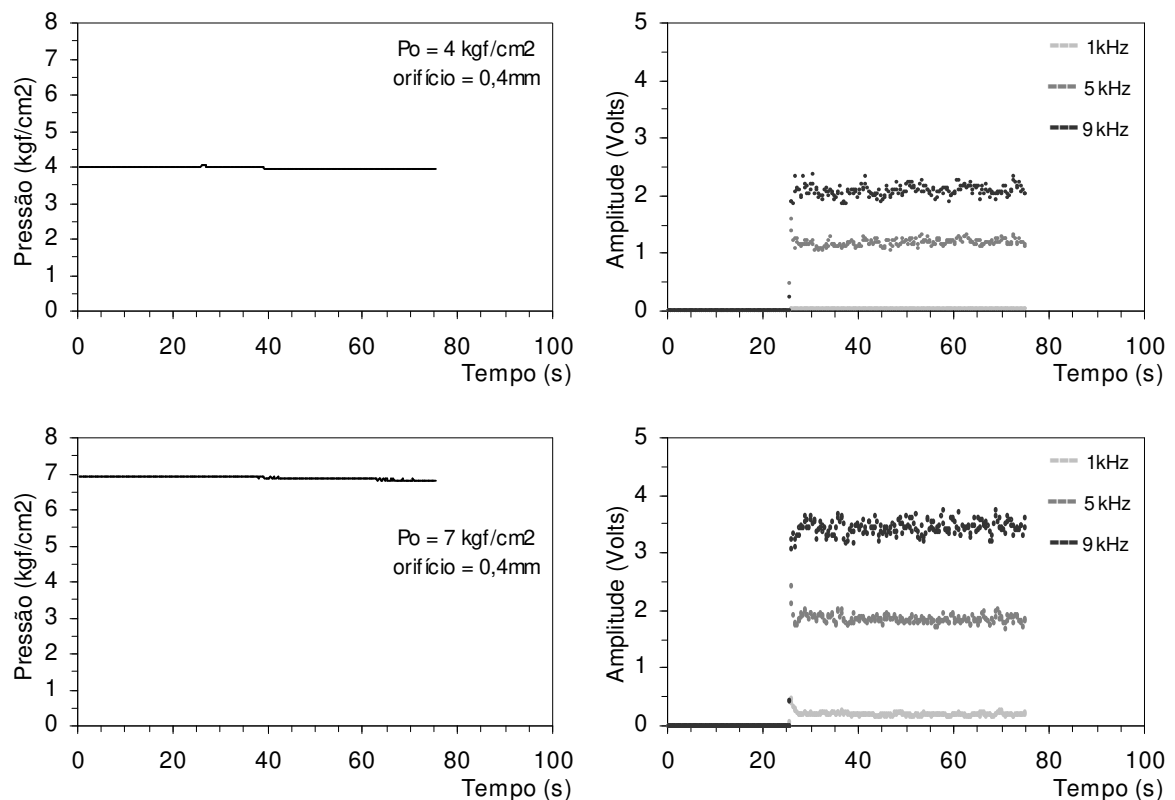


Figura 5.11 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,4mm).

As frequências utilizadas foram às mesmas que aquelas utilizadas na detecção com o vaso sem alimentação de ar: 1kHz, 5kHz e 9kHz. Em ambos os casos, com e sem alimentação contínua, estas frequências foram escolhidas por apresentarem maior variação em amplitude.

A Figura 5.11 mostra que as amplitudes das frequências geradas estão relacionadas com a pressão interna do vaso. Ou seja, para o mesmo orifício e uma pressão inicial de  $4\text{kgf/cm}^2$  a amplitude da frequência dominante não passa de 2,5 Volts enquanto que para uma

pressão inicial de  $7 \text{ kgf/cm}^2$  a amplitude da frequência dominante chega a 3,5 Volts.

Da mesma forma que para o vaso sem alimentação contínua, o aumento do orifício aumenta a amplitude do ruído sonoro gerado pelo vazamento. Foi mantido o mesmo padrão de amplificação, ou seja, 8 vezes para o orifício de 0,1mm de diâmetro, 4 vezes para o orifício de 0,4mm de diâmetro e ganho 1 para os orifícios superiores à 0,8mm de diâmetro.

Comparando as Figuras 5.12 e 5.13 observa-se o aumento da amplitude do ruído sonoro com o aumento do diâmetro do orifício. Para a mesma pressão inicial de  $7 \text{ kgf/cm}^2$ , a amplitude da frequência dominante fica na faixa de 2,5 Volts na figura 5.12 enquanto que na figura 5.13, a amplitude fica na faixa de 3,0 Volts.

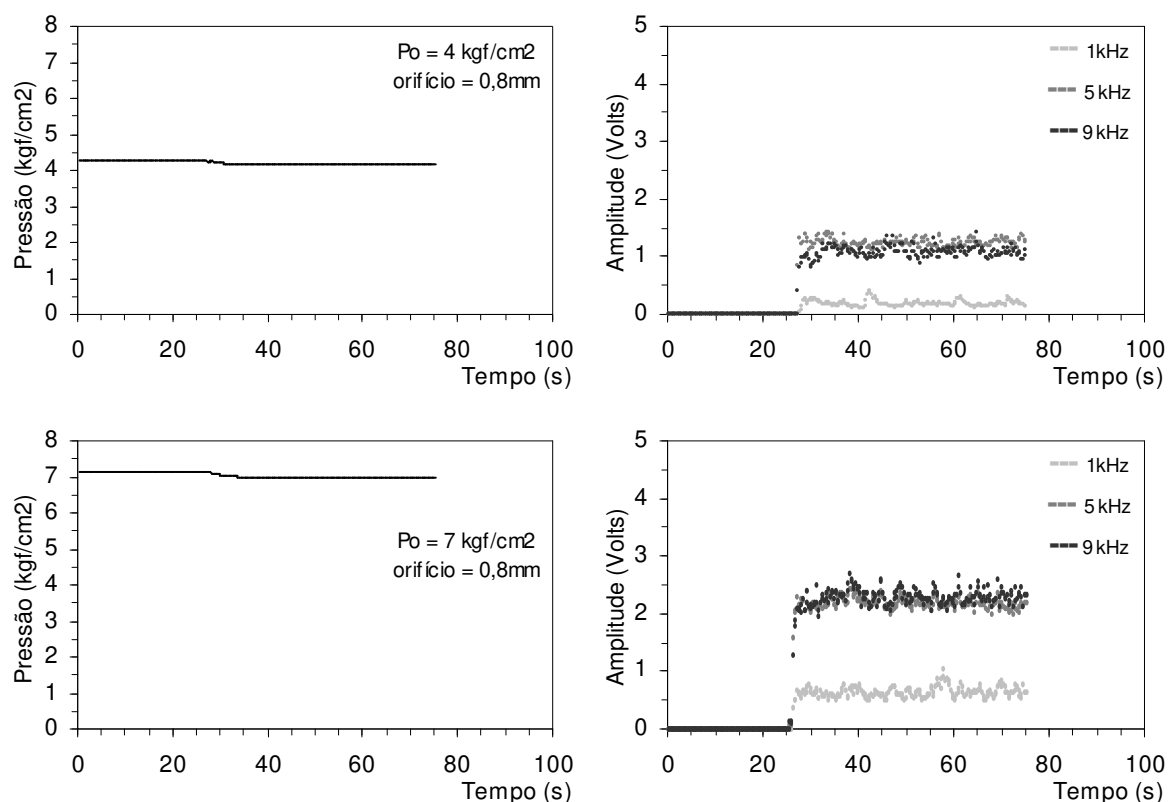


Figura 5.12 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,8mm).

Da mesma forma que para o vaso sem alimentação contínua, o aumento do orifício provoca também uma alteração na frequência dominante do sistema. Frequências abaixo de 1kHz apresentam sons mais graves enquanto que frequências acima de 9 kHz apresentam sons mais agudos.

Observando a Figura 5.10 que corresponde ao orifício de 0,1 mm, tem-se que a amplitude da frequência de 9 kHz supera em muito a amplitude da frequência de 5kHz enquanto que a amplitude da frequência de 1 kHz não aparece, indicando um som predominantemente agudo.

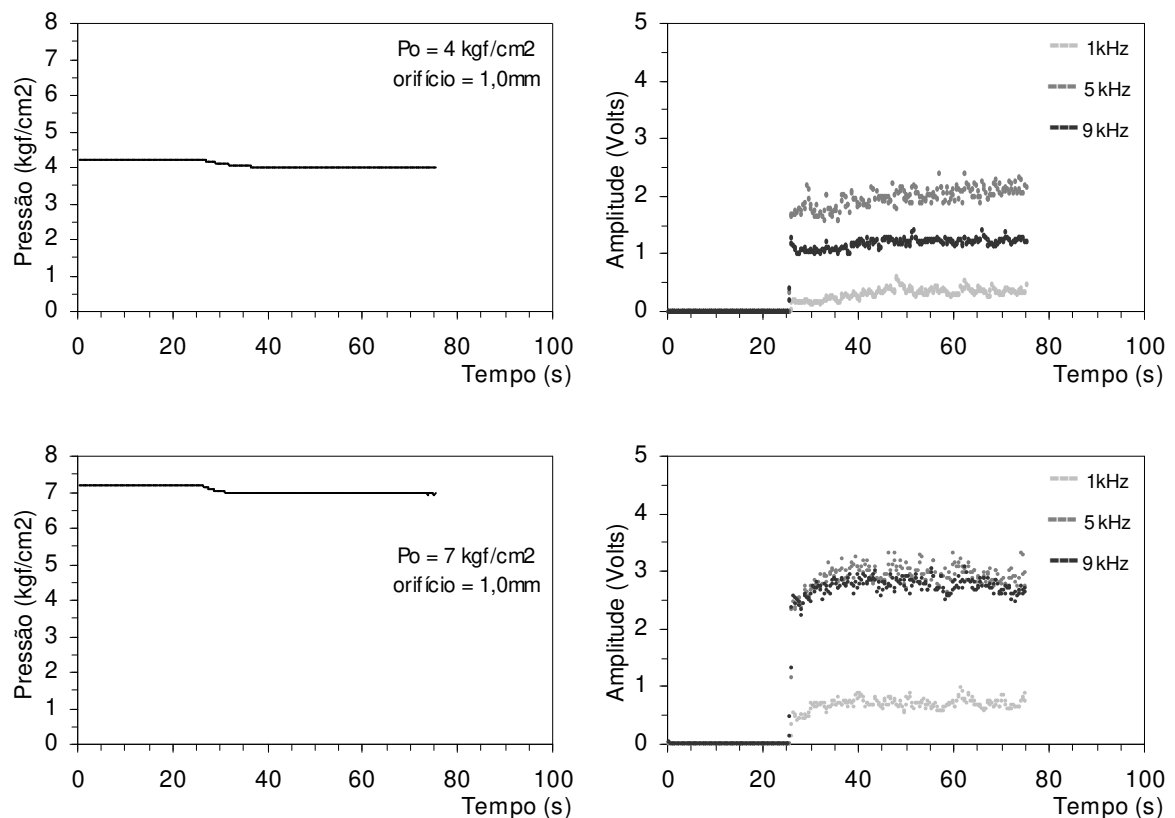


Figura 5.13 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,0mm).

Na Figura 5.11, que corresponde ao orifício de 0,4 mm, a diferença em amplitude entre a frequência de 9 kHz e a frequência de 5 kHz diminuiu bastante. Na Figura 5.12, a diferença entre as amplitudes das frequências de 9 kHz e 5 kHz é praticamente nula. Para o orifício de 1,0 mm, que corresponde à Figura 5.13, a frequência de 5kHz supera a frequência de 9 kHz indicando um som mais grave. Portanto, temos que para orifícios pequenos o ruído sonoro é mais agudo se comparado aos orifícios maiores cujo ruído sonoro é mais grave.

Como visto nas Figuras acima, o aumento da pressão interna do vaso também pode tornar o ruído mais agudo, ou seja, temos que para a pressão de  $4 \text{ kgf/cm}^2$ , a amplitude da

freqüência de 9 kHz é menor que a amplitude da freqüência de 5 kHz, enquanto que para a pressão de 7 kgf/cm<sup>2</sup>, a diferença entre as amplitudes das mesmas freqüências é bem menor. Esta relação não se revelou válida para todos os orifícios.

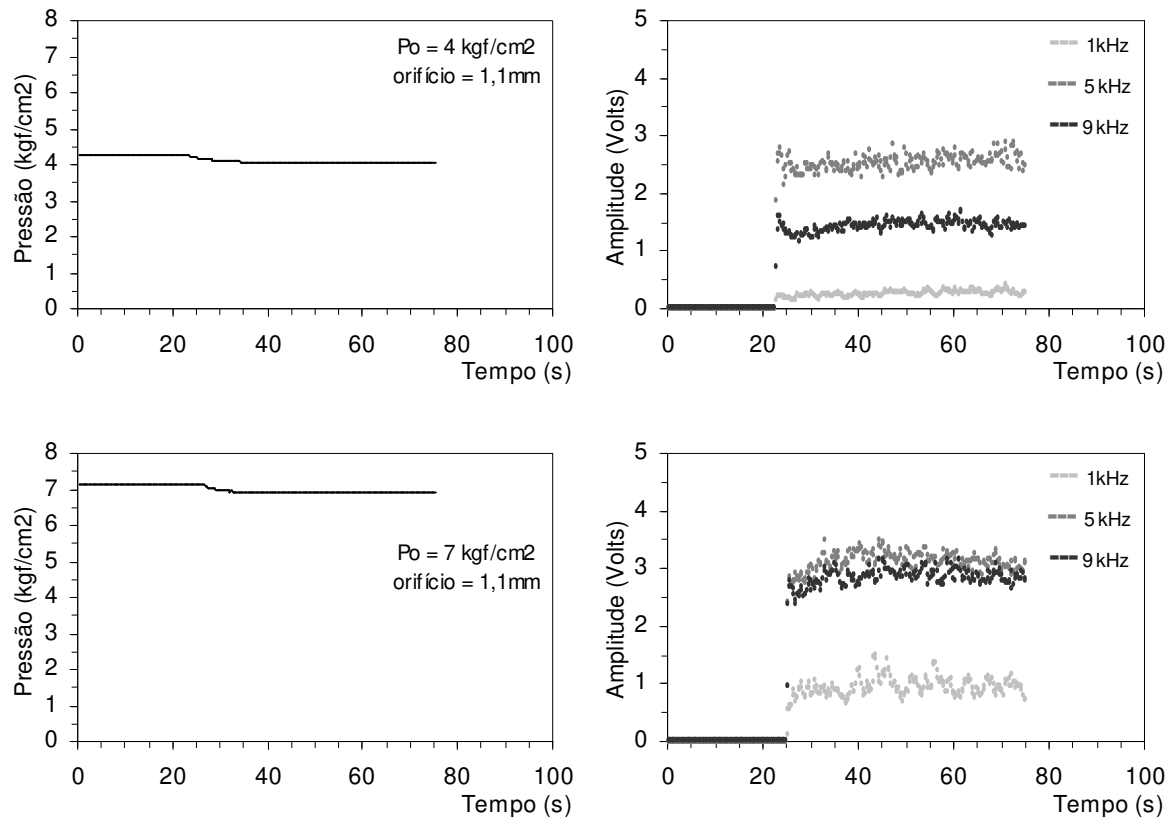


Figura 5.14 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,1mm).

Ao contrário das respostas obtidas para o vaso sem alimentação contínua, as amplitudes das freqüências não se alteram ao longo do tempo, isso porque a pressão é mantida constante.

Comparando as Figuras 5.13 e 5.14 observa-se que, para a mesma pressão, o pequeno aumento no diâmetro no orifício não alterou a resposta ao longo do tempo, apenas gerou um aumento em amplitude nas três freqüências principais.

Podemos observar nas Figuras 5.15 a 5.17 que as amplitudes das freqüências de 5 kHz e 9 kHz ultrapassam o limite em que a placa de aquisição pode converter que é de 4,75 Volts. Como na análise para o vaso sem alimentação, a saturação da amplitude das freqüências

ocorre para vazamentos maiores que 1,5 mm. Mesmo assim, a amplitude da frequência de 1kHz continua a aumentar e chega ao seu ponto de saturação quando utilizado um orifício de 2,0mm na pressão de 5 kgf/cm<sup>2</sup>. Na Figura 5.17 a saturação da amplitude das frequências ocorre para os vazamentos provocados através dos orifícios de 3,2 e 4,0 mm, já a uma pressão de 4 kgf/cm<sup>2</sup>.

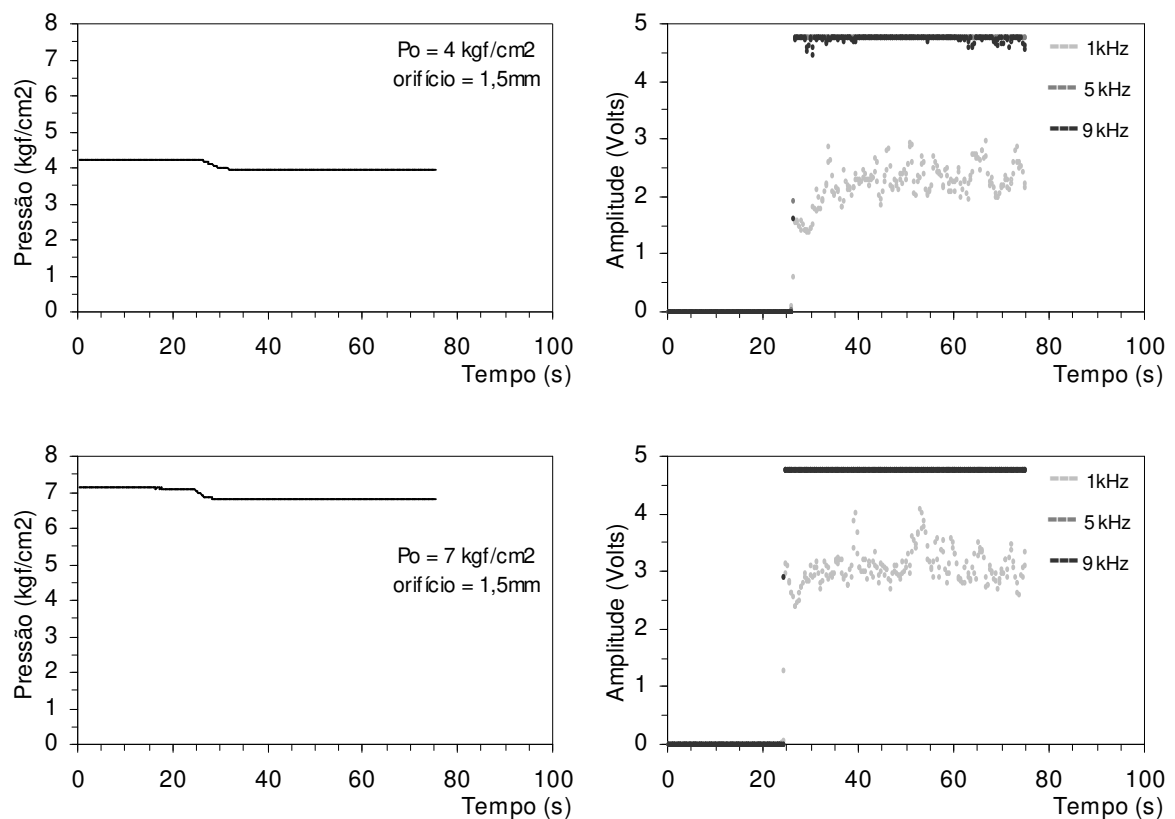


Figura 5.15 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,5mm).

Essa saturação é causada devido ao ganho do circuito banco de filtros passa faixa que foi ajustado para detectar vazamentos em orifício de 1,0 mm, conforme dito anteriormente. Esse tipo de resposta não influencia na detecção do vazamento, uma vez que antes de provocar o vazamento, as amplitudes dos filtros de frequência são nulas e, após o vazamento, essas amplitudes assumem maior grandeza. Esse aumento de amplitude é significativo para atuar num controlador que poderá fechar a alimentação de gás para o vaso.

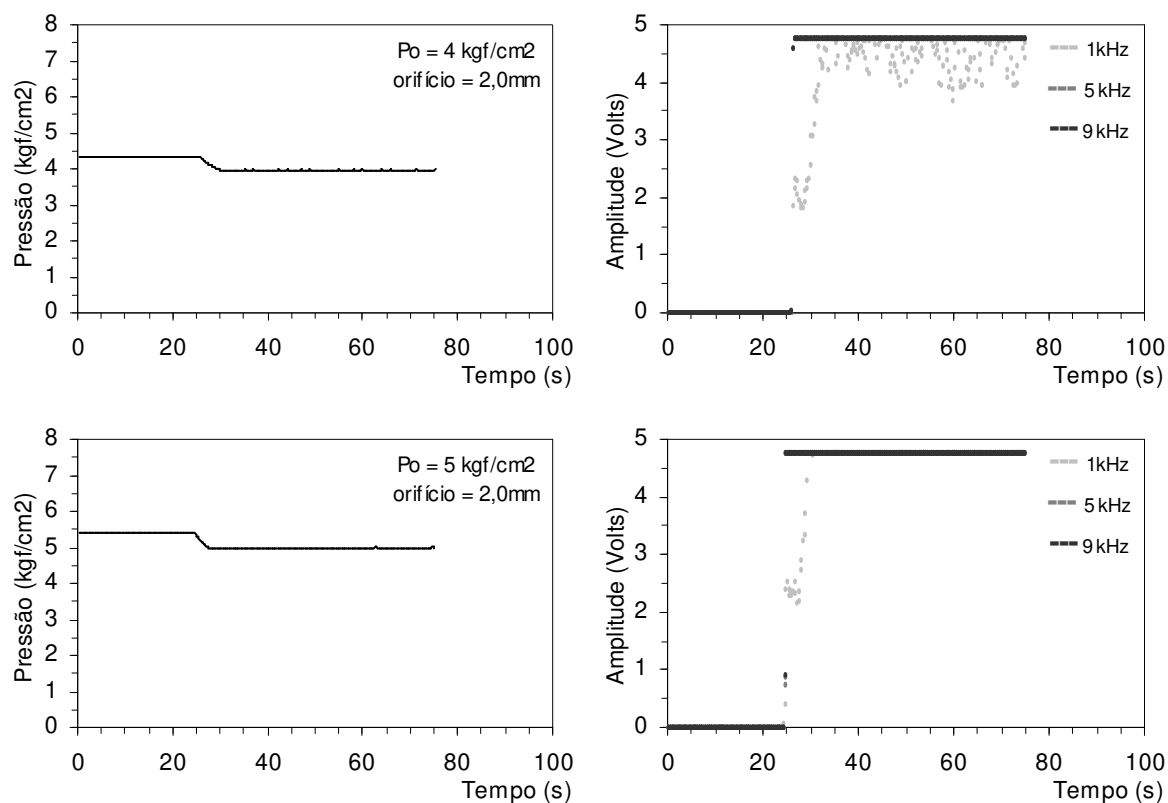


Figura 5.16 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 2,0mm).

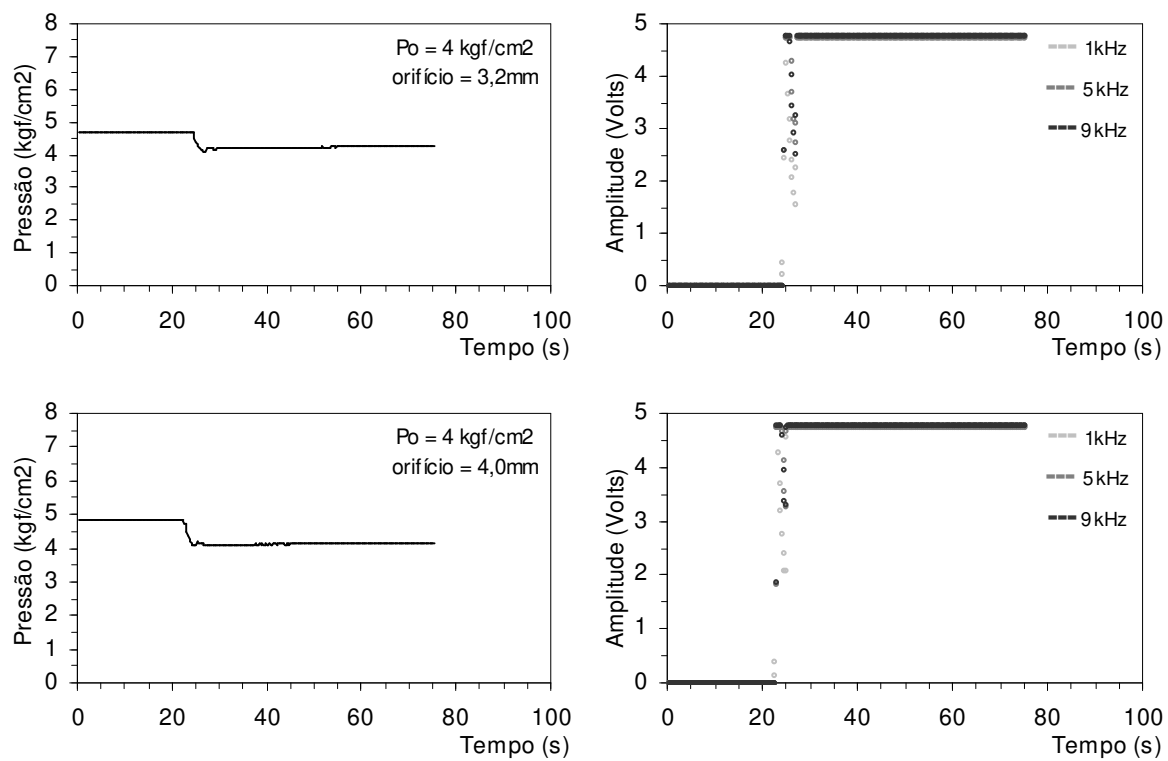


Figura 5.17 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifícios 3,2mm e 4,0mm).

## ***6 - Conclusões e Sugestões***

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e teste de uma técnica de detecção de vazamentos em vasos de pressão, utilizando-se sistemas sônicos. Foram detectados e analisados os transientes de pressão e as variações em amplitude, causadas pelo ruído sonoro, quando da ocorrência de vazamento em um vaso de pressão de 37,5 litros operando com ar comprimido, com e sem alimentação contínua.

O equipamento para detecção constituiu-se de um transdutor de pressão, um microfone de eletreto, acoplados a um computador PC através de uma placa ADA. O microfone foi conectado com a placa ADA através de duas interfaces analógicas:- um circuito pré-amplificador de microfone e, um circuito banco de filtros passa faixa. Os elementos que compõem a montagem experimental foram desenvolvidos no Laboratório.

A detecção foi realizada para diversas condições de operação:- pressão interna do vaso variando de 1 a 7 kgf/cm<sup>2</sup> e diâmetro do orifício (magnitude do vazamento) variando de 0,1 a 4 mm. O experimento foi realizado em duas etapas sendo que na primeira o vaso foi mantido sem alimentação contínua de ar, até o seu esvaziamento total e, na segunda etapa, o vaso foi mantido com alimentação contínua, mantendo sua pressão interna constante.

Para a aquisição e análise dos dados provenientes do transdutor de pressão e do microfone em tempo real foi desenvolvido um programa em linguagem C.

## **6.1 - Conclusões**

Os resultados obtidos no presente trabalho mostraram que é possível detectar vazamentos em vasos de pressão através do ruído sonoro gerado por este vazamento.

A técnica de detecção mostrou-se eficiente na detecção de vazamentos de menor grandeza (orifício de 0,1mm de diâmetro), mesmo que a pressão interna do vaso não sofra variações.

Foi comprovado experimentalmente que, no instante que o vazamento é provocado, um ruído sonoro é gerado e, as frequências que compõe esse ruído, variam com o diâmetro do orifício (utilizado para simular o vazamento), e com a pressão interna do vaso. Foram observados dois comportamentos distintos e que ocorrem ao mesmo tempo para as frequências presentes no ruído sonoro: o aumento em conjunto das amplitudes e o aumento individual das amplitudes.

O aumento no diâmetro do orifício e o aumento da pressão interna do vaso são diretamente proporcionais ao aumento em conjunto das amplitudes das frequências presentes no ruído sonoro, indicando um aumento na intensidade do som e, quanto maior o ruído gerado, maior a facilidade de detecção.

A mudança do orifício e a mudança na pressão interna do vaso alteram individualmente as frequências presentes no ruído sonoro, indicando uma mudança na altura do som, que é determinado pela frequência dominante. Para vazamentos provocados por orifícios pequenos, tem-se um som predominante mais agudo se comparado aos vazamentos provocados por orifícios grandes. O mesmo ocorre para a pressão interna do vaso, quanto maior, mais agudo é o som emitido.

Foi observado também que existe a proporcionalidade entre a pressão inicial e o tempo necessário para esvaziar o vaso. O aumento no diâmetro do orifício acentua a queda de pressão.

## ***6.2 – Sugestões para trabalhos futuros***

Para dar continuidade ao presente trabalho, sugere-se:

- Aplicar a técnica para detecção de vazamentos em vasos de pressão contendo ar a uma pressão superior a  $7 \text{ kgf/cm}^2$  e utilizando orifícios inferiores a 0,1 mm,
- Aplicar a técnica para detecção de vazamentos em vasos de pressão contendo outros tipos de fluidos,
- Observar a eficiência da técnica proposta para o vaso em funcionamento e com ruído de fundo numa planta em operação,
- Desenvolver uma técnica de localização de vazamento em vasos de pressão,
- Desenvolver um sistema supervisor que possa atuar logo que o vazamento seja detectado,
- Estudar a possibilidade de conectar a saída do circuito banco de filtros passa faixa num controlador lógico programável (CLP),
- Estudar a possibilidade de substituir o PC por um circuito dedicado.

## ***REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

BELSITO, S., BANERJEE, S. Leak detection in pipelines based on neural networks. *The First European Congress on Chemical Engineering*, v.1, p.771-774, 1997, Florence, Italy.

BELSITO, S., LOMBARDI, P., ANDREUSSI, P., BANERJEE, S. Leak detection in liquefied gas pipeline by artificial neural networks. *AIChE Journal*, v.44, n.12, p.2675-2688, 1998.

BLACK, P. A review of pipeline leak detection technology. *Pipeline System*, V.7, *Fluid Mechanics and its application*, Dordrecht. Kluwer Academic Publishers. p.287-298, 1992.

BOYLESTAD, R. L., NASHELSKY, L. *Dispositivos eletrônicos e teoria dos circuitos*, 6.ed., Rio de Janeiro:LTC - Livros técnicos e científicos, Editora S.A., 1999. Cap. 2.

BRAGA, C. F. *Detecção de vazamentos por computador “on-line” em tubulações transportando misturas gás-líquido*. Universidade Estadual de Campinas, 2001, Tese de Mestrado.

BUIATTI, C. M. *Monitoramento de tubulações por técnicas computacionais on-line*. Universidade Estadual de Campinas, 1995, Tese de Mestrado.

CARIATI, S. A. *Detecção de vazamentos por computador “on-line” em tubulações transportando líquido e misturas gás-líquido*. Universidade Estadual de Campinas, 1999, Tese de Mestrado.

CHUNG, W.-Y., LEE, D.-D. Real time multi-channel gas leakage monitoring system using CPLD chip. *Sensors and actuators B*, v.77, p.186-189, 2001.

KRYTER, R. C., Loose part monitoring program and recent operational experience in selected U.S. and Western European commercial nuclear power station. *Oak Ridge National Laboratory report*, NUREG/CR-3687, 1984.

KUPPERMAN, D. S., PRINE, D., MATHIESON, T. Application of acoustic leak detection technology for the detection and location of leaks in light water reactors. *Argonne National Laboratory report*, NUREG/CR-3687, 1988.

LUCIA, A. C., TONOLINI, F. General review of recent activities in acoustic emission technology in Italy. *Nuclear Engineering and Design*, v.113, p.81-86, 1989.

MACIAS, I. B. *Detecção de Vazamentos em Tubulações Transportando Gás*. Universidade Estadual de Campinas, 2004, Tese de Mestrado.

MACLEOD, I. D., ROWLEY, R., BEESLEY, M. J., OLLEY, P. Acoustic monitoring techniques for structural integrity. *Nuclear Engineering and Design*, v.129, p. 191-200, 1991.

MIZRAHI, V. V. *Treinamento em linguagem C++ - Módulo 1*, São Paulo: Makron Books, 1994, 300 p.

MIZRAHI, V. V. *Treinamento em linguagem C++ - Módulo 2*, São Paulo: Makron Books, 1994, 318 p.

NAVES, G. J. *Técnicas de computação em tempo real em controle e supervisão de tubulações*. Universidade Estadual de Campinas, 1991, Tese de Mestrado.

ORSINI, L. Q. *Curso de circuitos elétricos Vol 2*. São Paulo: Ed. Edgard Blücher LTDA, 1994, 770 p.

SANDBERG, C., HOLMES, J., MCCOY, K., KOPPITSCH, H. The application of a continuous leak detection system to pipelines and associated equipment. *IEEE Transaction on Industry Applications*, v.25, n.5, p.906-909, 1989.

SHEEN, S.-H., CHIEN, H.-T., RAPTIS, A. C. Ultrasonic Techniques for Detecting Helium Leaks. *Argonne National Laboratory*, USA, 2000.

SHIMANSKIY, S., IJIMA, T., NAOI, Y. Development of Microphone Leak Detection Technology on Fugen NPP. *Progress in Nuclear Energy*, v.43, n.1, p.357-364, 2003

SILVA, A. R. *Supervisão de tubulações por computador on-line*. Universidade Estadual de Campinas, 1996, Tese de Mestrado.

SOUZA, A. L. *Detecção de vazamentos em tubulações através da Análise Espectral*. Universidade Estadual de Campinas, 1996, Tese de Doutorado.

STREICHER, S. J. Acoustic monitoring systems - System concept and field experience. *Nuclear Engineering and Design*, v.129, p. 151-162, 1991.

WATANABE, K., HIMMELBLAU, D. M. Detection and location of a leak in a gas transport pipeline by a new acoustic method. *AIChE Journal*, v.32, n.10, p.1690-1701, 1986.

WIKE, A. Liquid pipelines can use many varieties of SCADA-based leak detection systems. *Pipeline & Gas Journal*, v.213, n.6, p.16-20, 1986.

WOOD, B. R. A., HARRIS, R. W. Structural integrity and remnant life evaluation of pressure equipment from acoustic emission monitoring. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v.77, p.125-132, 2000.

ZHANG, J. Statistical pipeline leak detection for all operating conditions. *Pipeline & Gas Journal*, Fev 2001.

### ***Referências da Rede Internet***

C. R. Assessoria Trabalhista: <http://www.crassessoriatrabalhista.com.br/pages/vasos.asp>

Norma Regulamentadora NR-13: <http://www.sobes.org.br/nr13.htm>

Omnidirectional Electret Condenser Microphone: <http://www.d-audio.hu/pub/czn15e.html>

TARGET Engenharia e Consultoria: <http://www.target.com.br/portal/asp/matéria/matéria>

## ***Apêndice A***

### ***Transientes de pressão e variações em amplitude do ruído sonoro, causados por diversos tipos de vazamento num vaso de pressão sem alimentação contínua.***

Neste apêndice são apresentados os transientes de pressão juntamente com as variações em amplitude do ruído sonoro, provocados por diversos tipos de vazamentos num vaso de pressão.

Os ensaios foram realizados utilizando diferentes pressões iniciais e diferentes diâmetros de orifícios. O vaso foi mantido com a válvula de alimentação fechada e o tempo do experimento foi suficiente para que ele esvaziasse por completo após a abertura da válvula utilizada para provocar o vazamento.

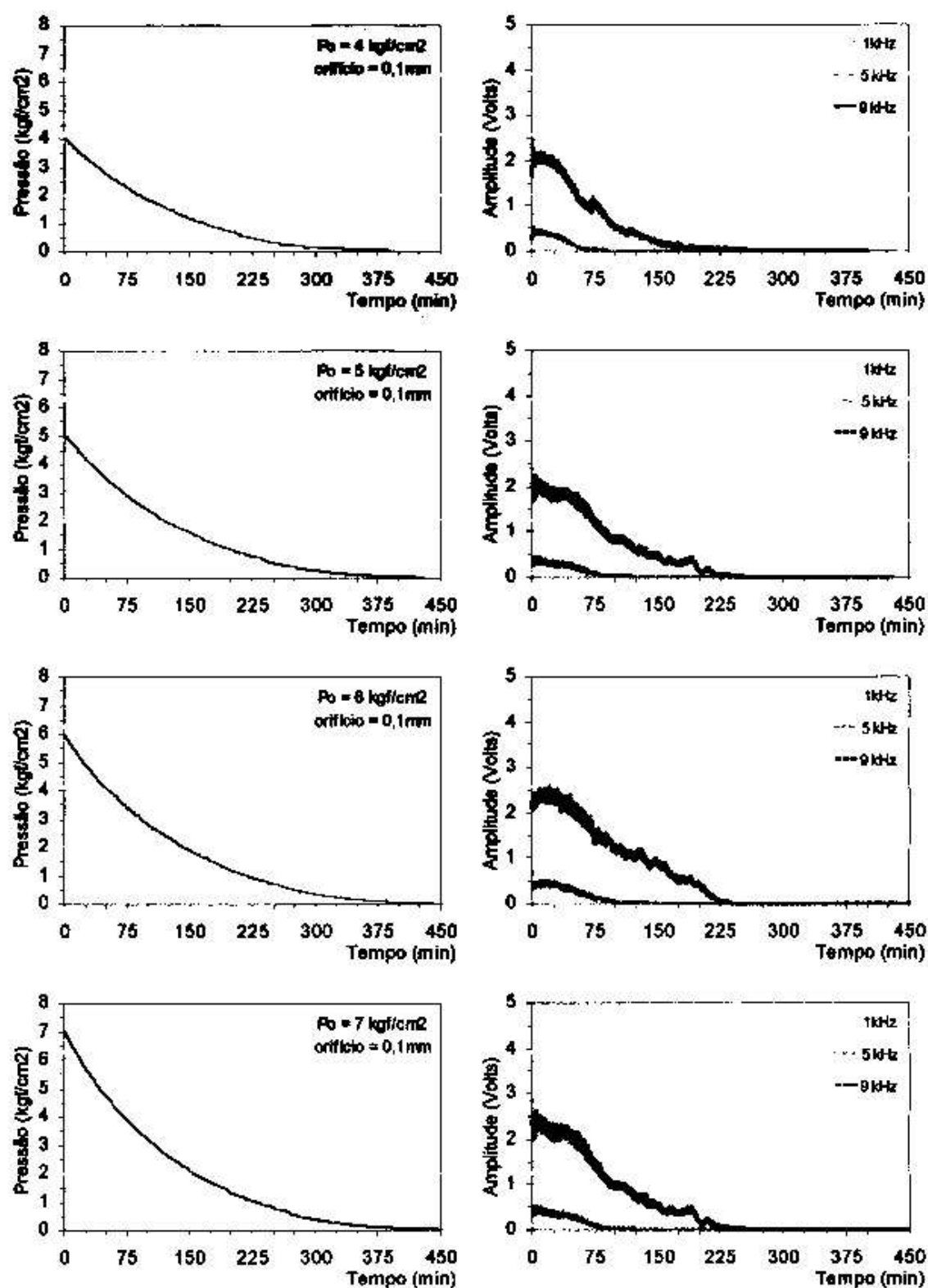


Figura A.1 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,1 mm).

Vaso sem alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 8.

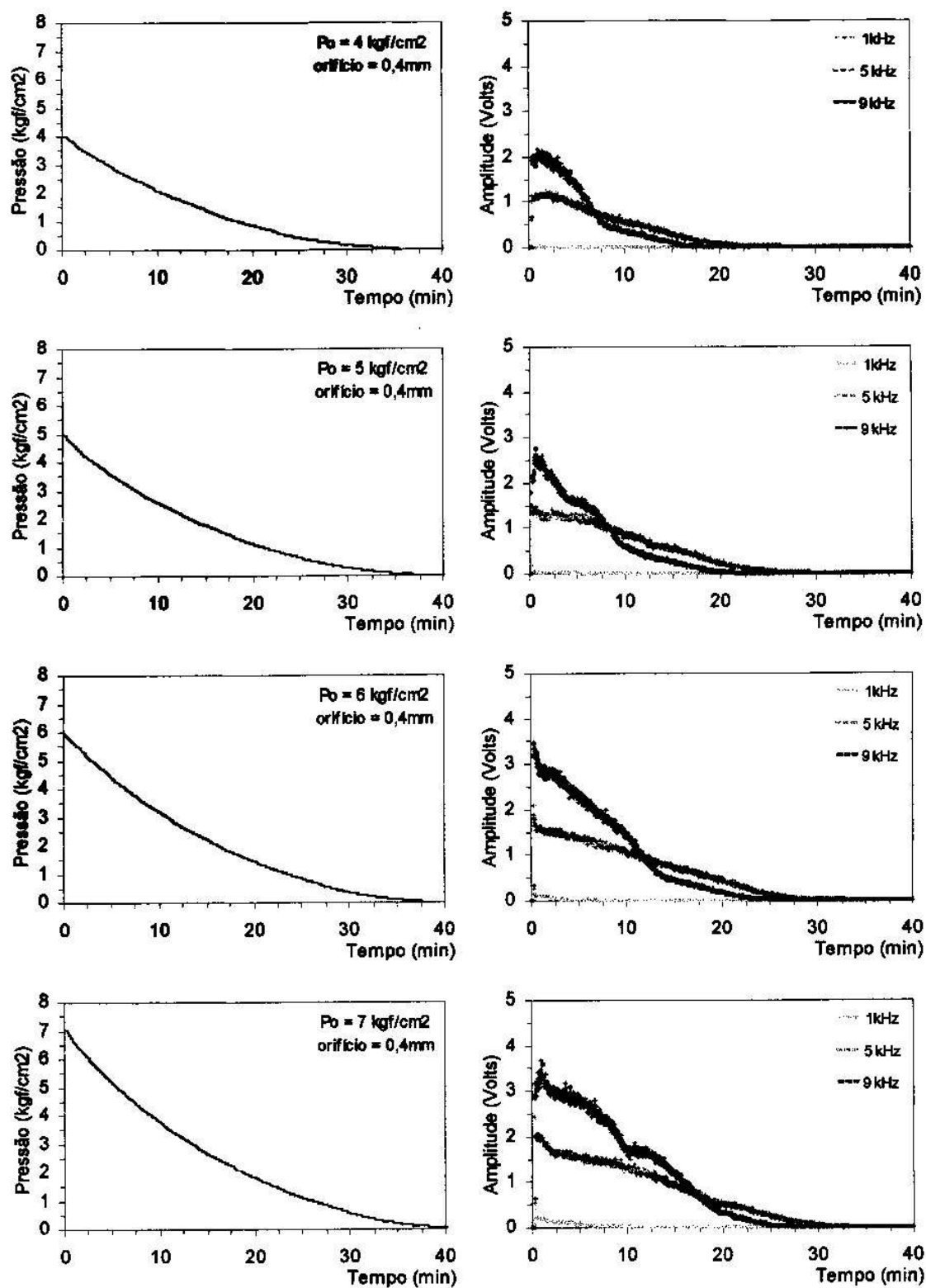


Figura A.2 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,4mm).

Vaso sem alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 4.

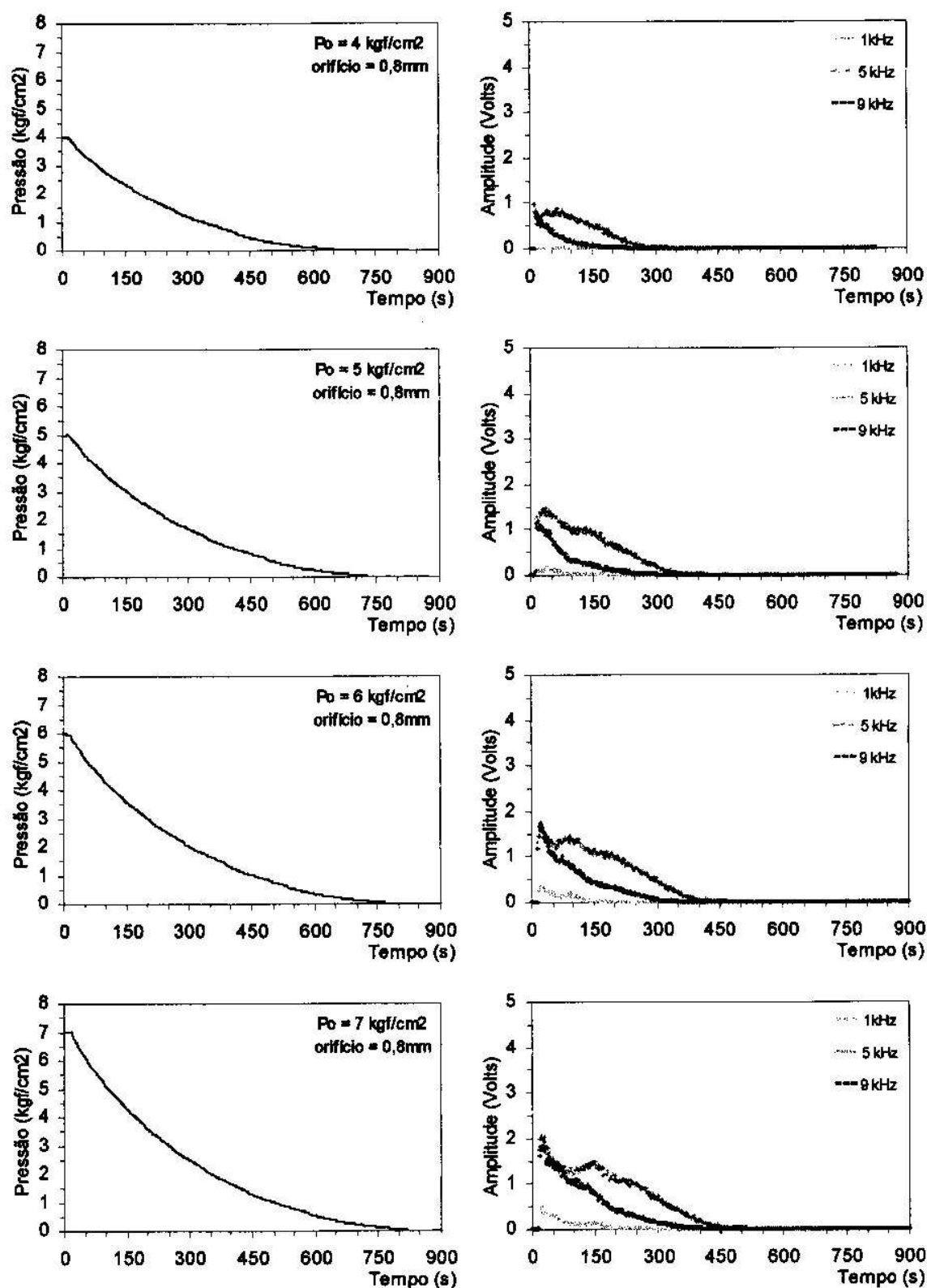


Figura A.3 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,8mm).

Vaso sem alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

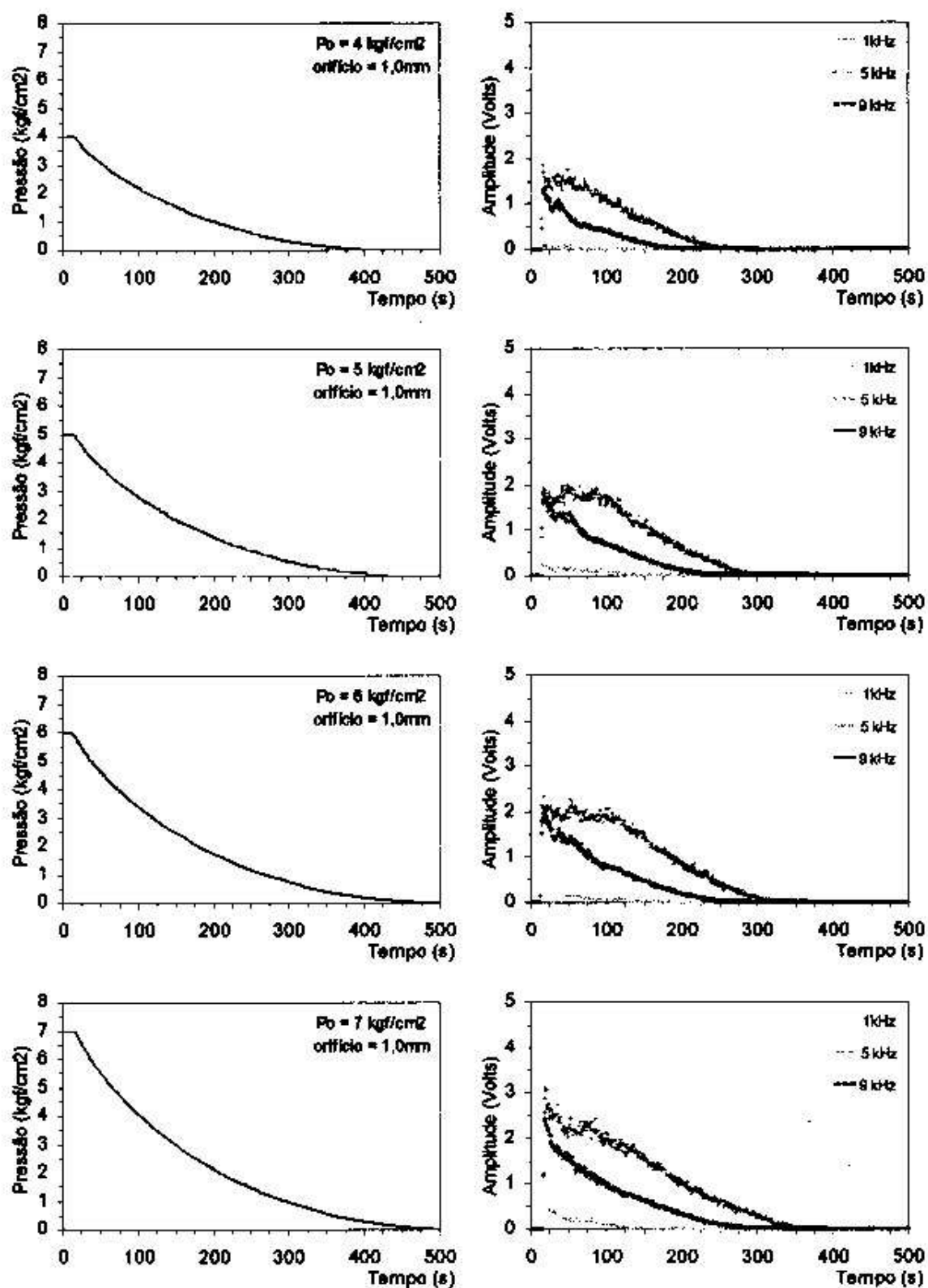


Figura A.4 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,0mm).

Vaso sem alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

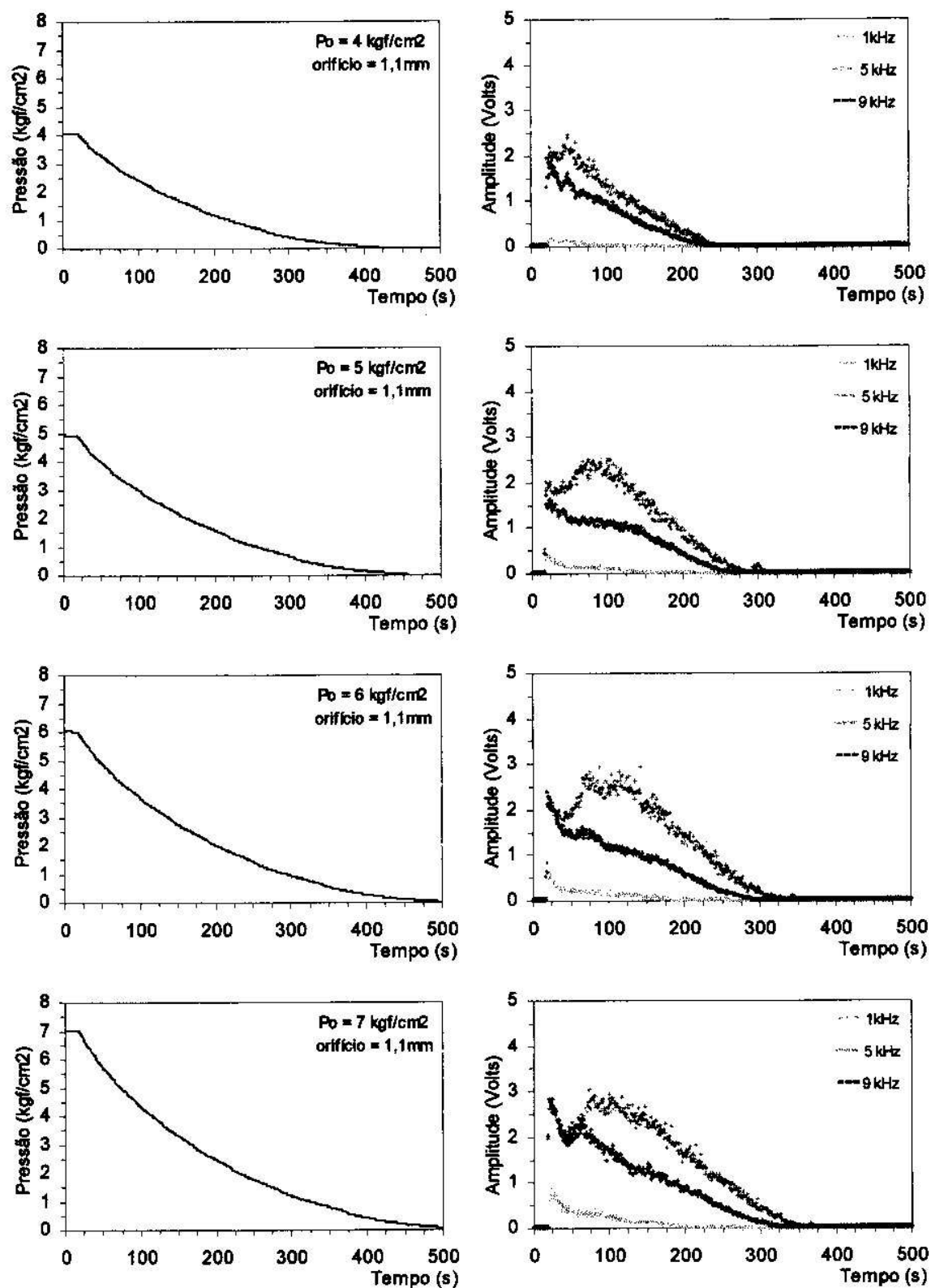


Figura A.5 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orificio 1,1mm).

Vaso sem alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

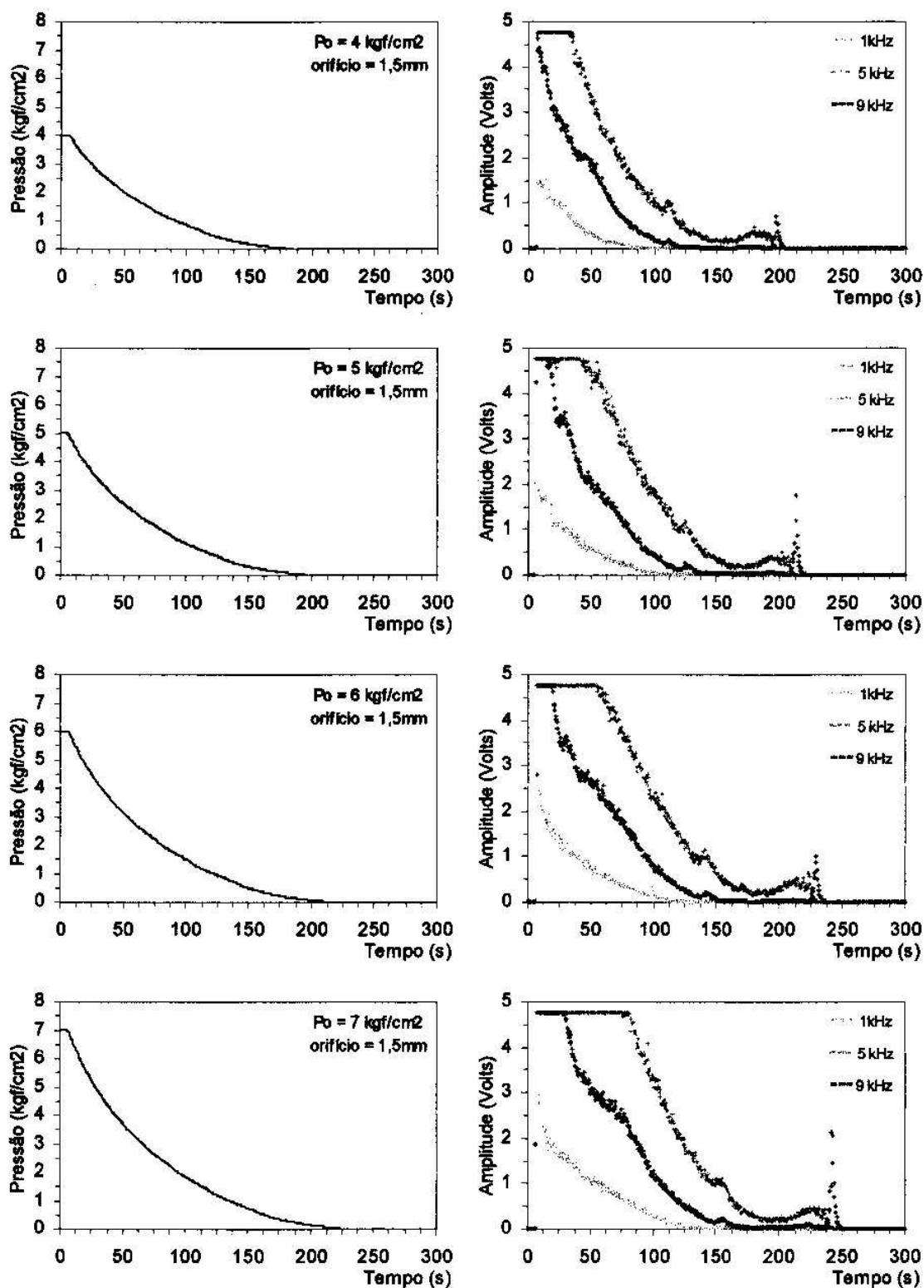


Figura A.6 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,5mm).

Vaso sem alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

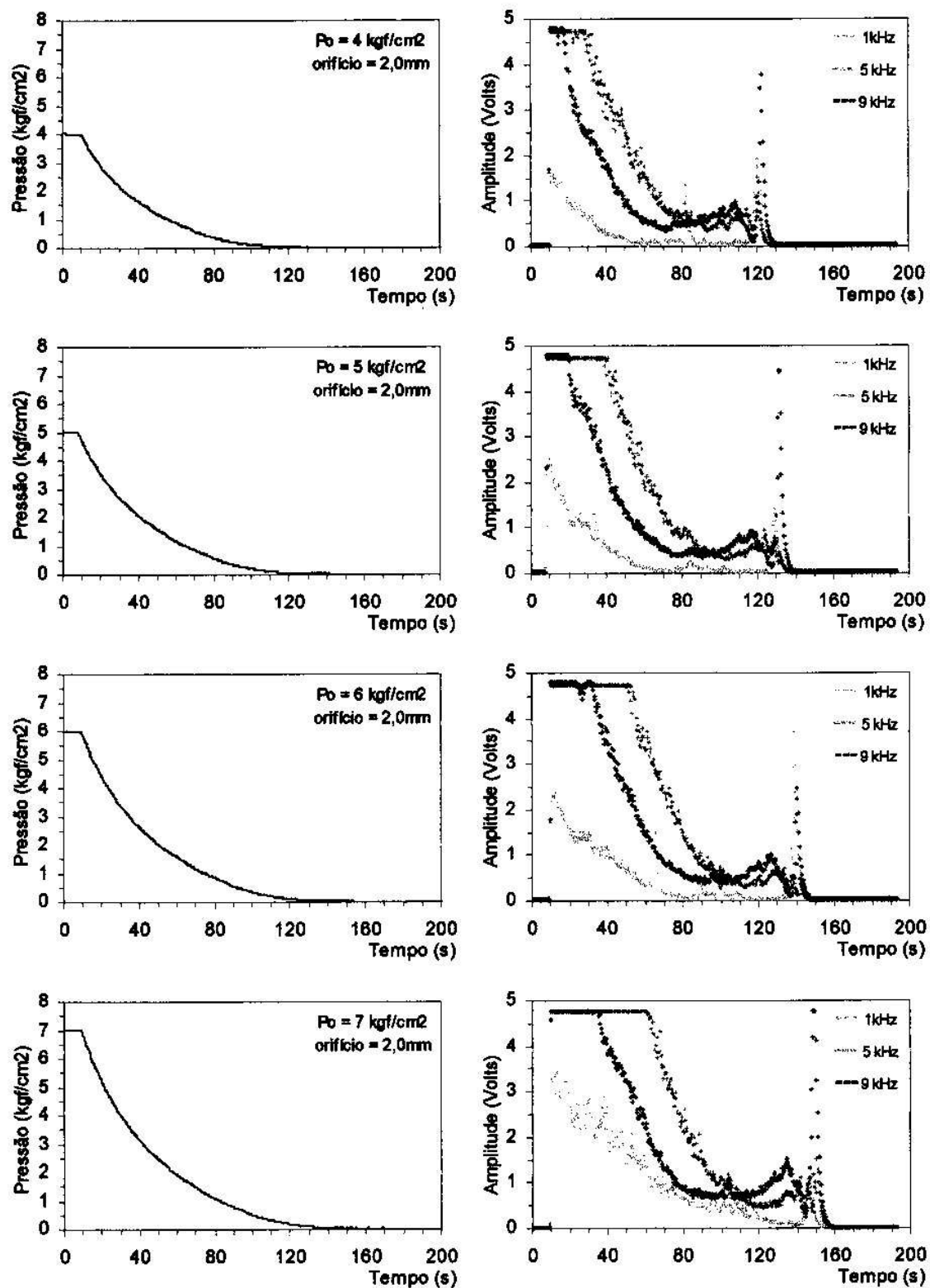


Figura A.7 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orificio 2,0mm).

Vaso sem alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

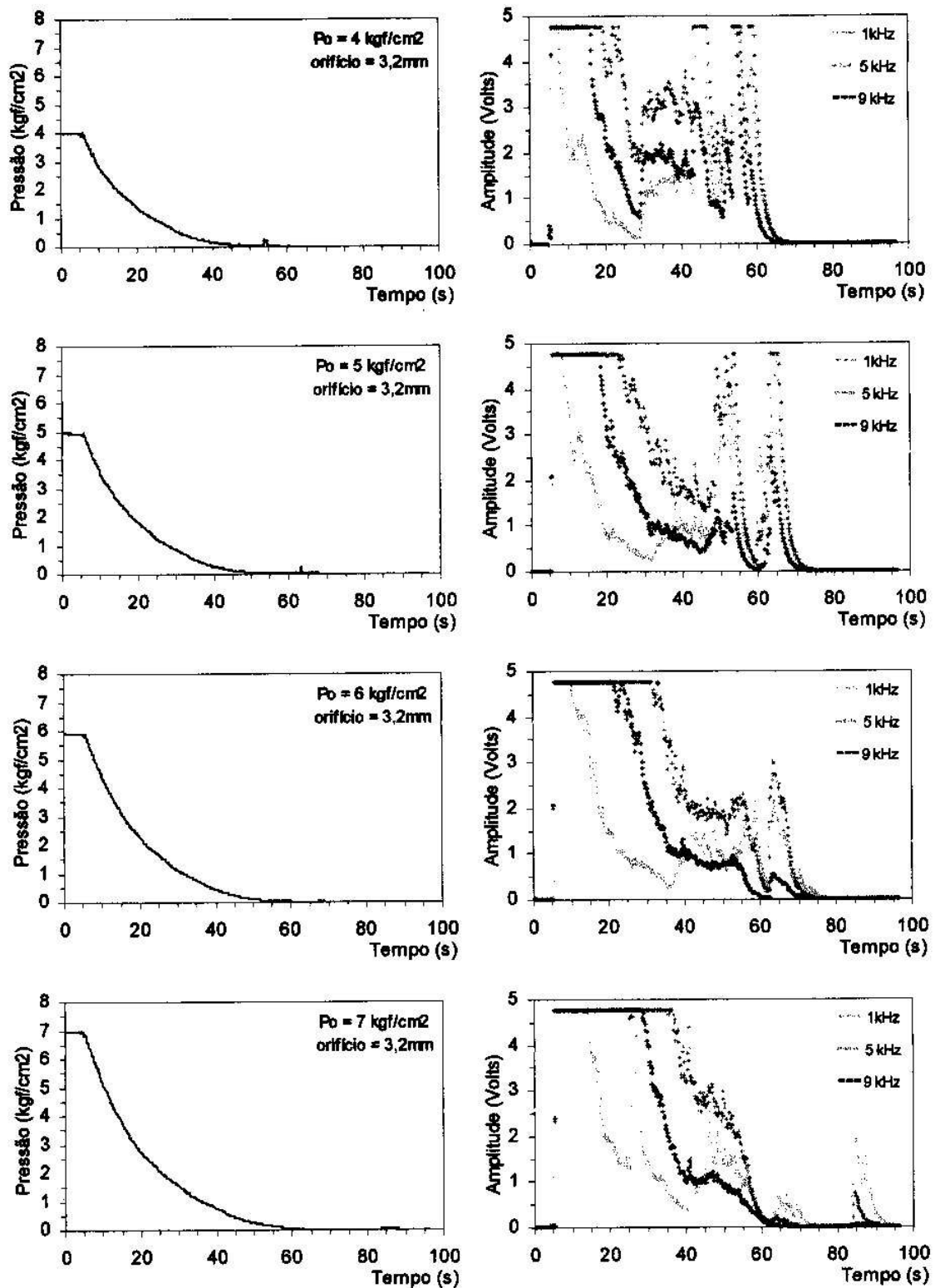


Figura A.8 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 3,2mm).

Vaso sem alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

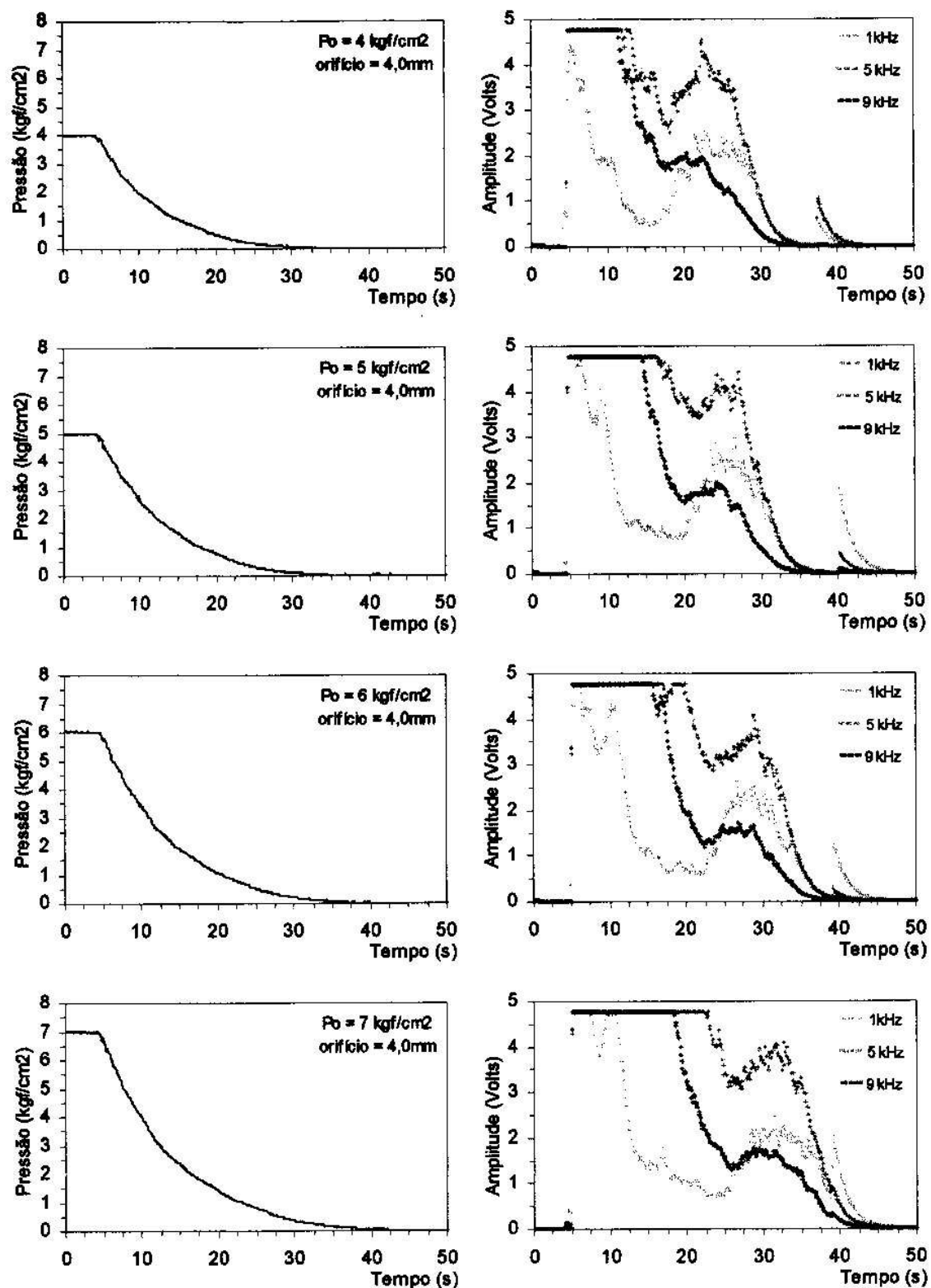


Figura A.9 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 4,0mm).

Vaso sem alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

## ***Apêndice B***

### ***Transientes de pressão e variações em amplitude do ruído sonoro, causados por diversos tipos de vazamentos num vaso de pressão com alimentação contínua.***

Neste apêndice são apresentados os transientes de pressão juntamente com as variações em amplitude do ruído sonoro, provocados por diversos tipos de vazamentos num vaso de pressão.

Os ensaios foram realizados utilizando diferentes pressões iniciais e diferentes diâmetros de orifícios. O vaso foi mantido com a válvula de alimentação aberta e o tempo do experimento foi suficiente para que a pressão interna do vaso se mantivesse constante após a abertura da válvula utilizada para provocar o vazamento.

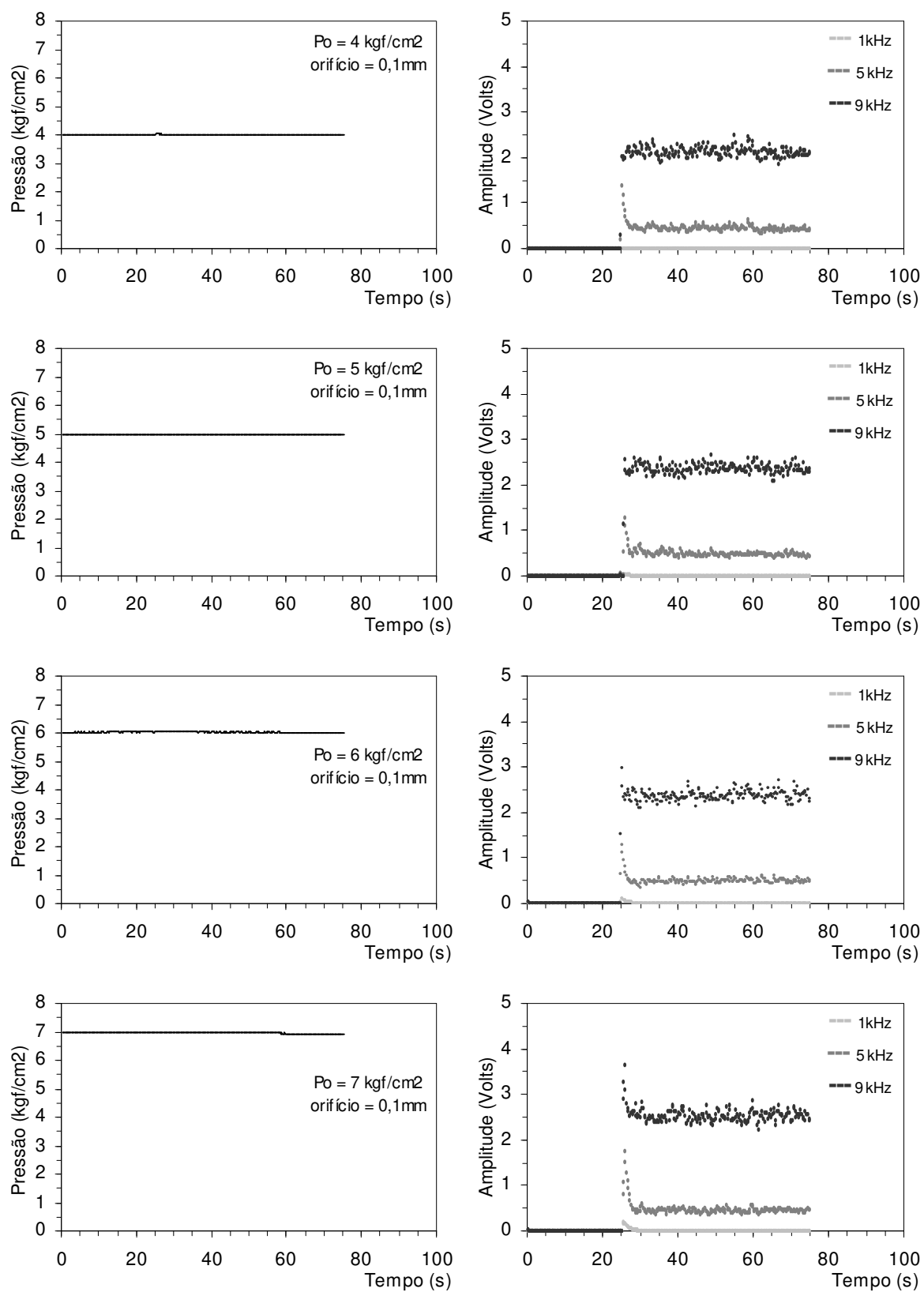


Figura B.1 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,1mm).

Vaso com alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 8.

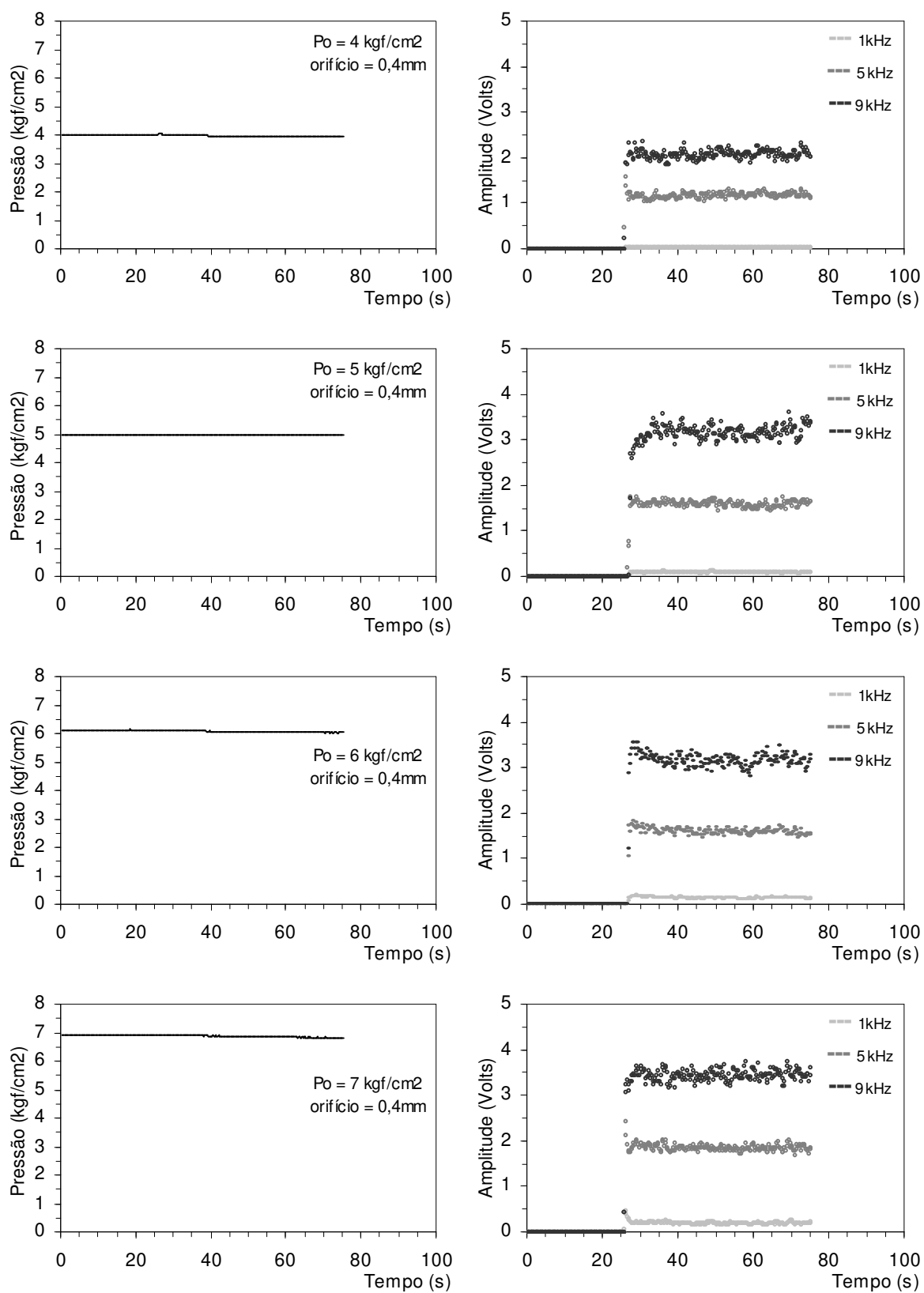


Figura B.2 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,4mm).

Vaso com alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 4.

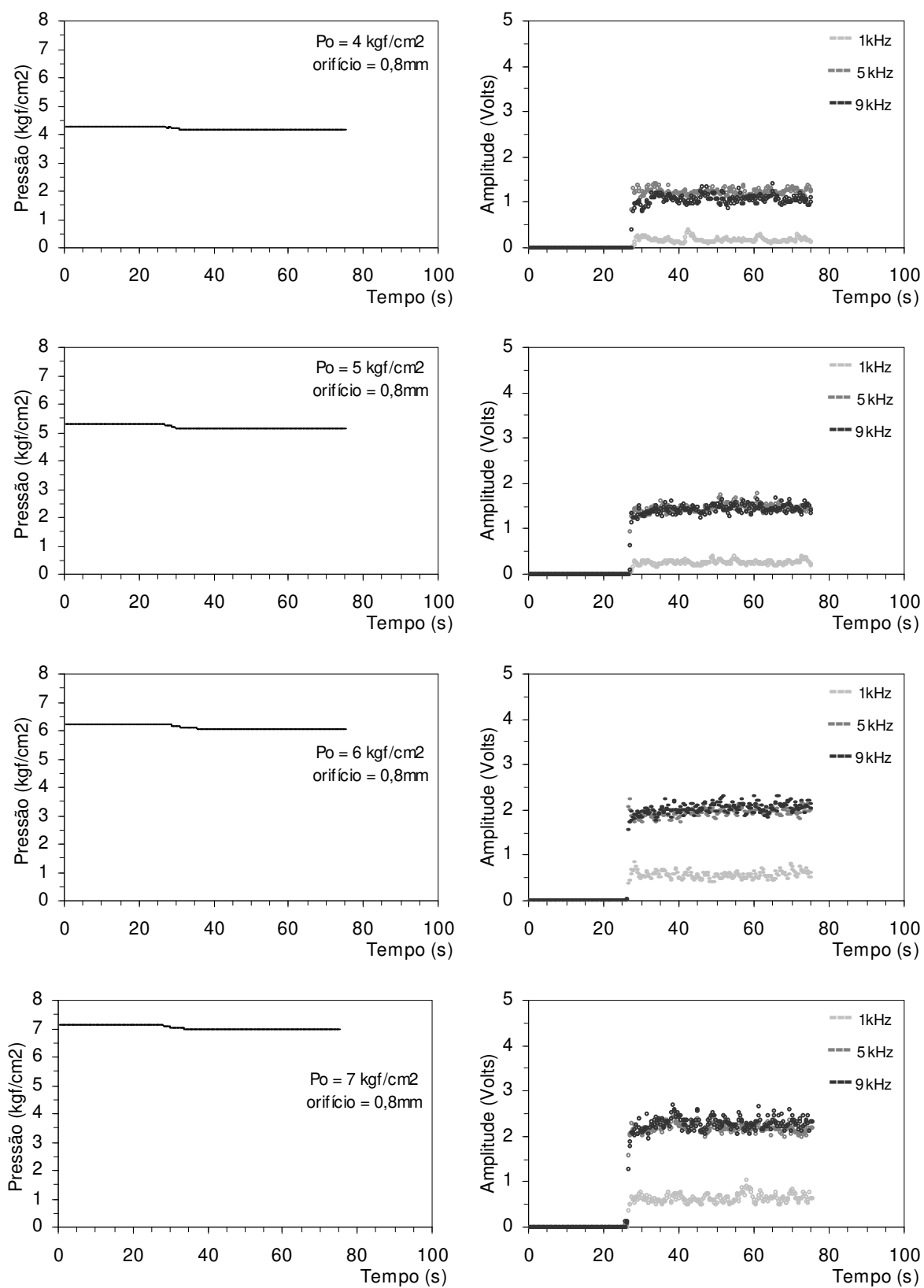


Figura B.3 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 0,8mm).

Vaso com alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

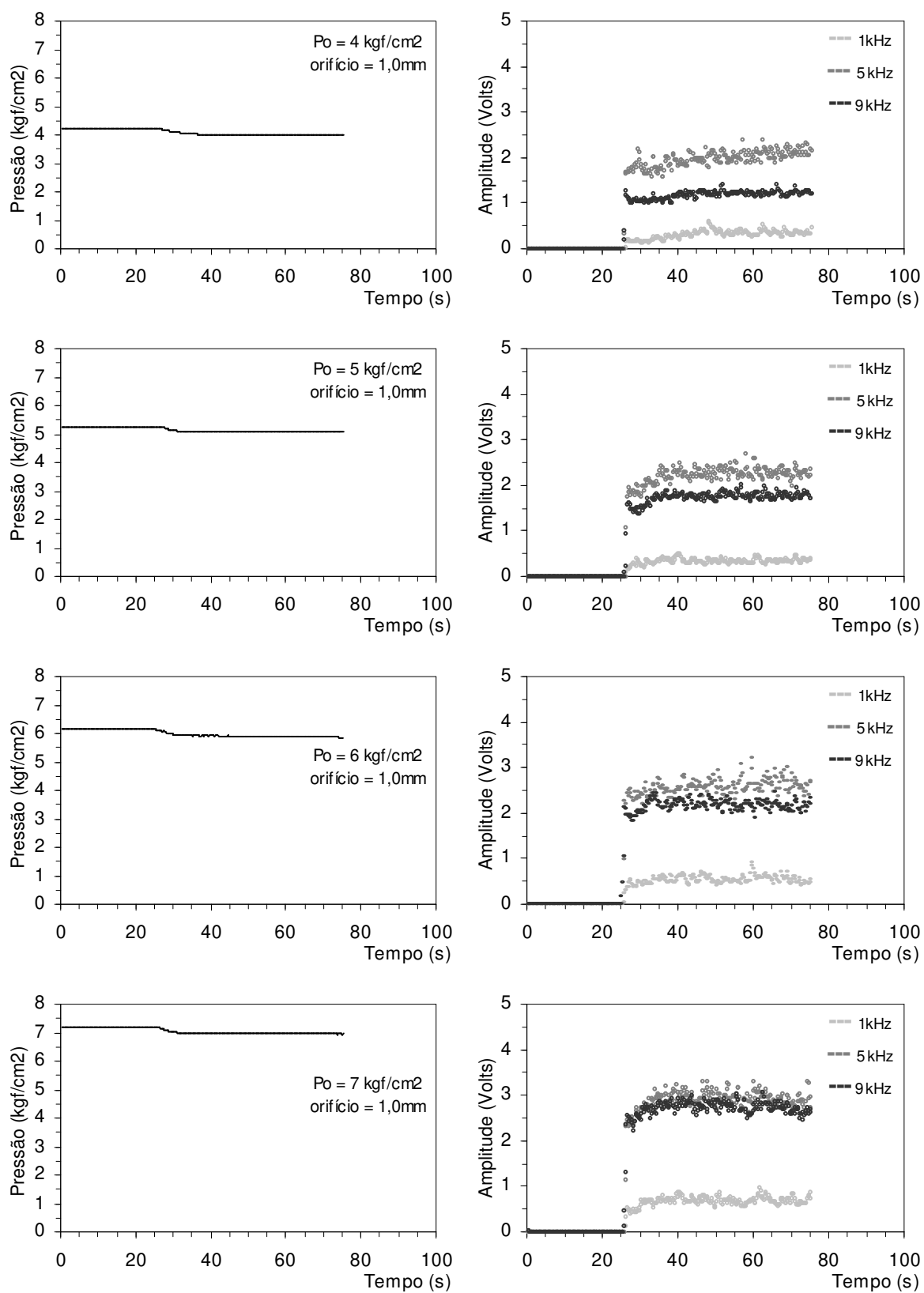


Figura B.4 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,0mm).

Vaso com alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

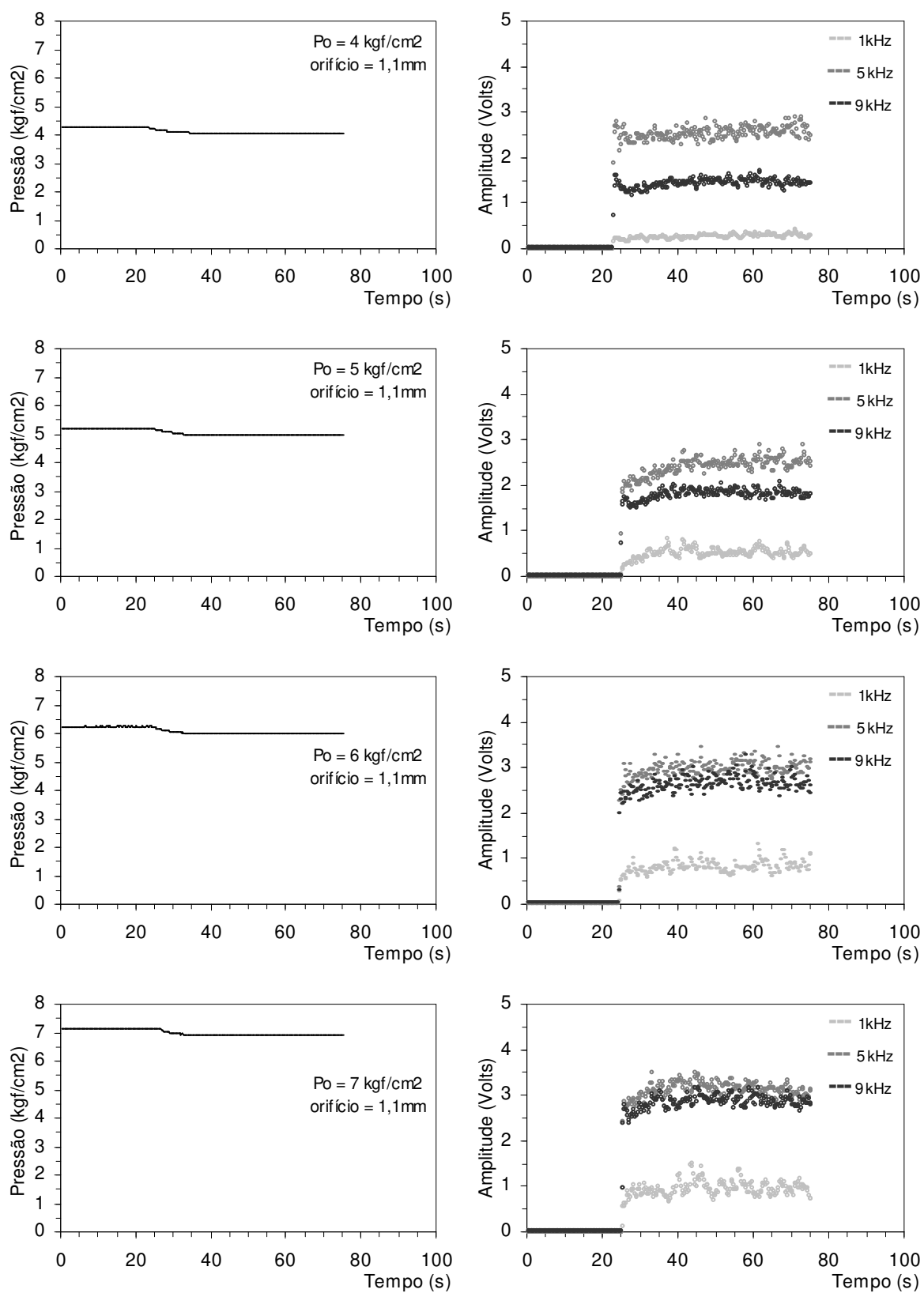


Figura B.5 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,1mm).

Vaso com alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

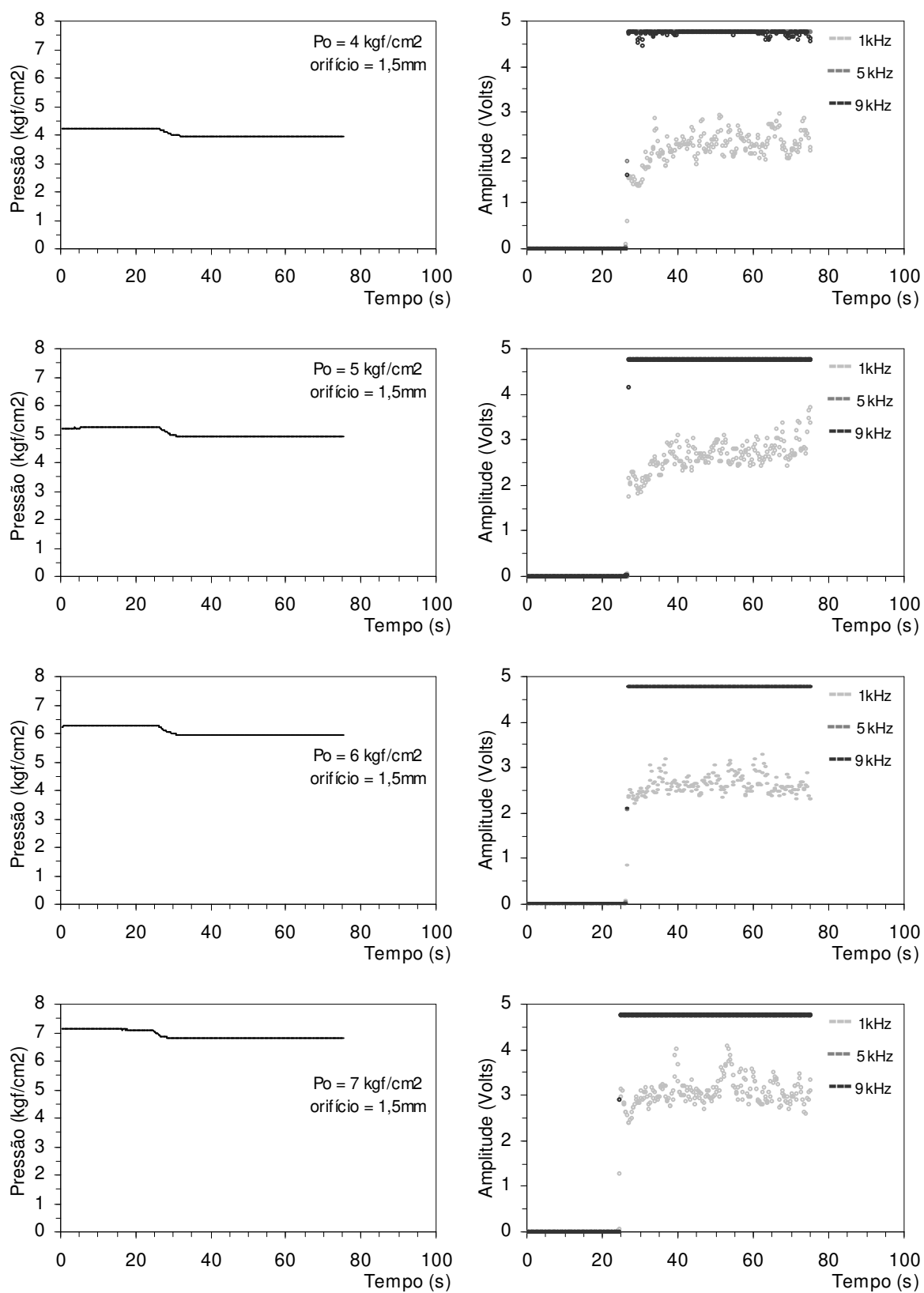


Figura B.6 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 1,5mm).

Vaso com alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

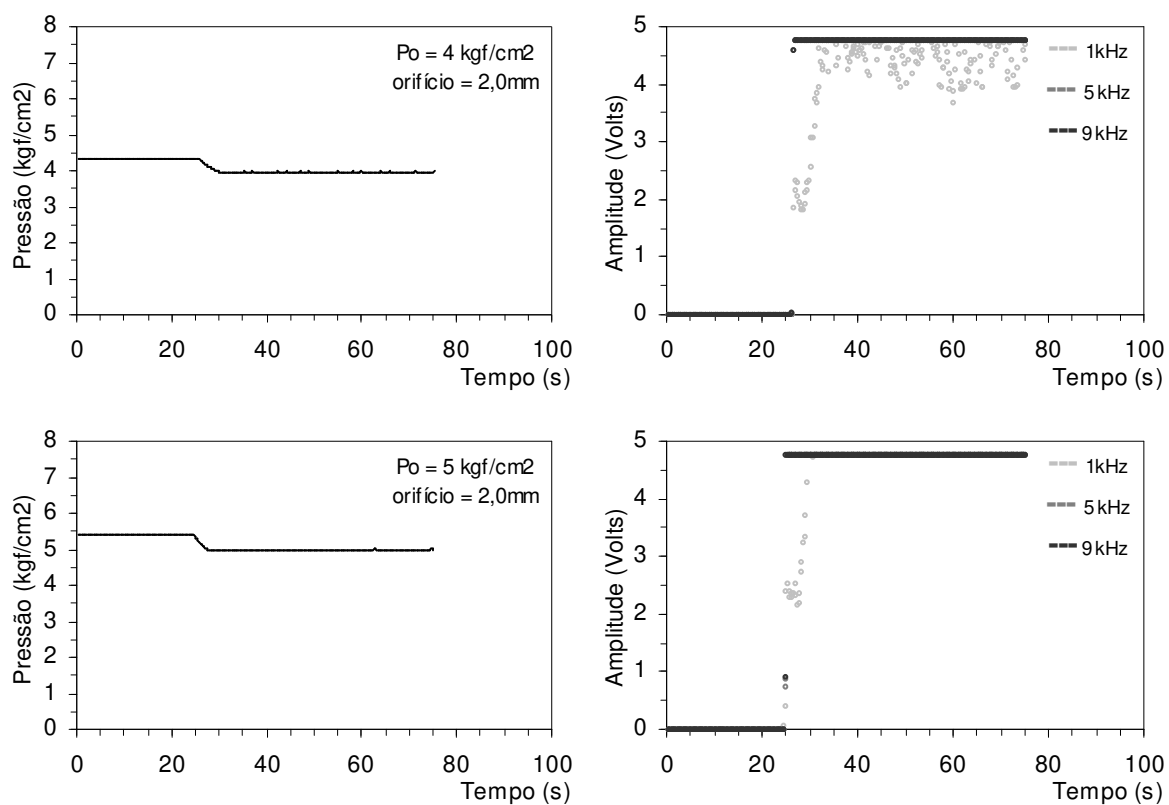


Figura B.7 - Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 2,0mm).  
Vaso com alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

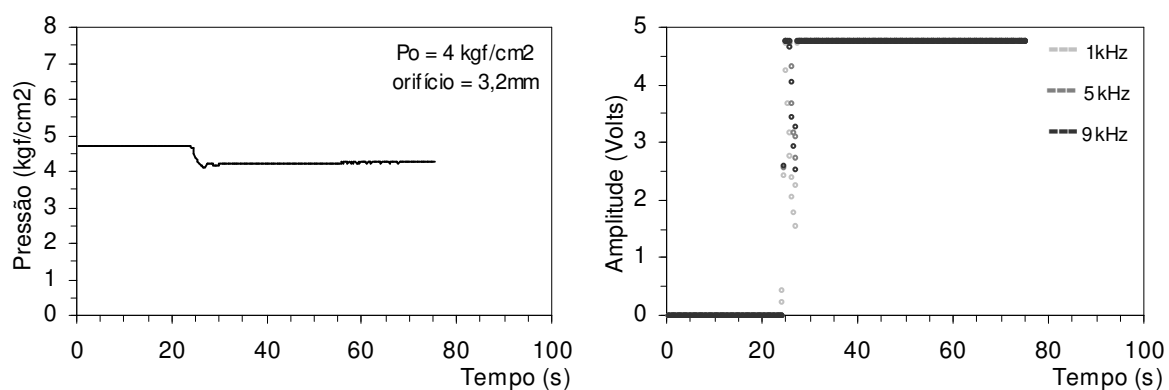


Figura B.8 - Transiente de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 3,2mm).  
Vaso com alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

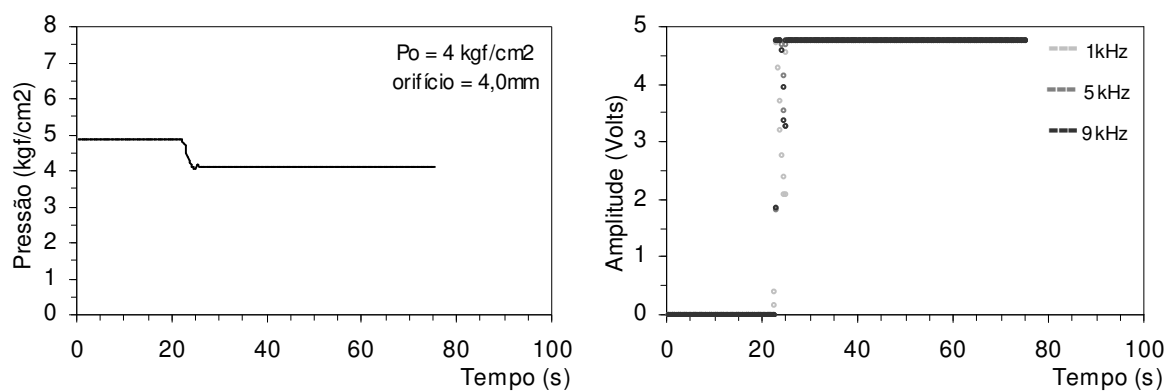


Figura B.9 - Transiente de pressão e amplitudes do ruído sonoro (orifício 4,0 mm).

Vaso com alimentação contínua e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

## ***Apêndice C***

### ***Diagrama elétrico do pré-amplificador de microfone***

Neste apêndice está apresentado o primeiro circuito eletrônico responsável por condicionar o sinal proveniente do microfone.

O circuito apresenta três estágios distintos:

- 1º Estágio: responsável pela alimentação e pela conversão de impedância do microfone.
- 2º Estágio: primeiro estágio de amplificação. Amplifica o sinal do microfone em 51 vezes.
- 3º Estágio: segundo estágio de amplificação. Amplifica o sinal proveniente do segundo estágio em 11 vezes.

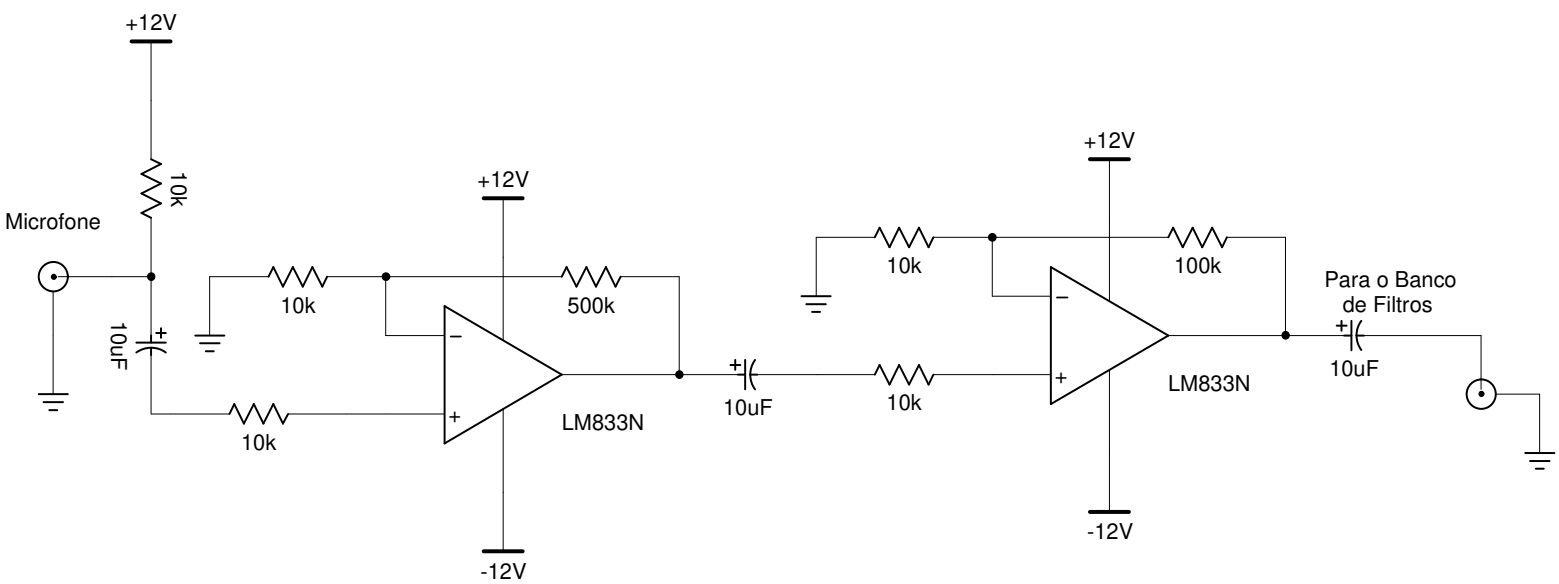


Figura C.1 – Diagrama elétrico do circuito pré-amplificador de microfone

## ***Apêndice D***

### ***Diagrama elétrico do circuito que compreende os filtros passa-faixa***

*Neste apêndice está apresentado o segundo circuito eletrônico responsável por condicionar o sinal proveniente do microfone.*

O circuito apresenta quatro estágios distintos:

- 1º Estágio: o sinal passa por um filtro passa-baixa cuja frequência de corte foi estipulada em 20kHz.
- 2º Estágio: responsável por amplificar o sinal proveniente do primeiro circuito eletrônico em até 11 vezes.
- 3º Estágio: compreende os filtros passa-faixa responsáveis por separar as três frequências escolhidas do sinal do microfone, especificadas em 1kHz, 5kHz e 9kHz.
- 4º Estágio: formado por três circuitos retificadores, um para cada frequência, responsáveis por transformar o sinal alternado em contínuo.

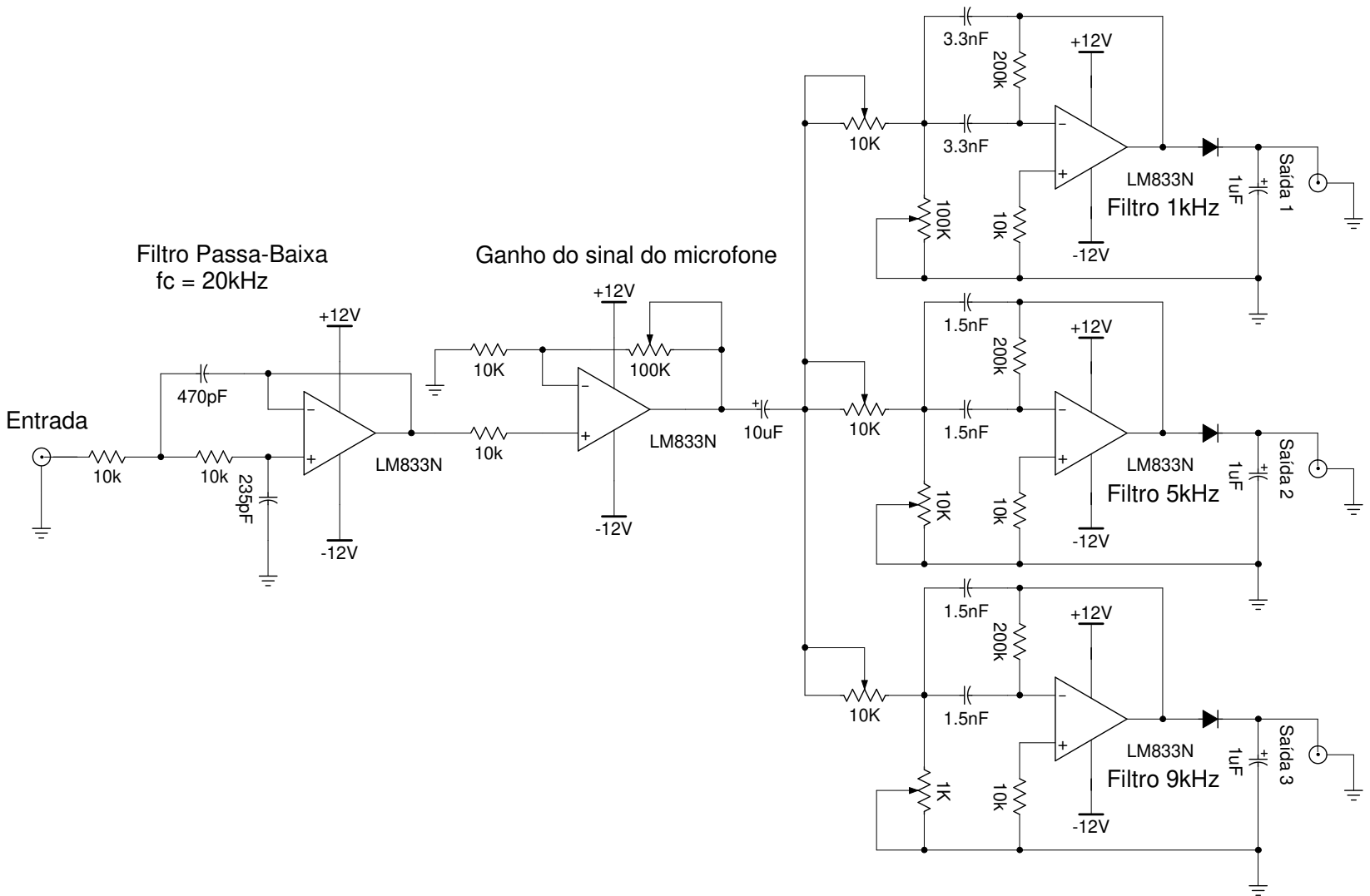


Figura D.1 – Diagrama elétrico do circuito banco de filtros passa-faixa

## ***Apêndice E***

***Diagrama elétrico do circuito que compreende a fonte de tensão contínua utilizada para alimentar os dois circuitos eletrônicos desenvolvidos.***

O circuito foi desenvolvido para gerar uma tensão contínua de +12 Volts e de -12 Volts a partir da rede elétrica de 127 Volts AC presente nos laboratórios da FEQ.

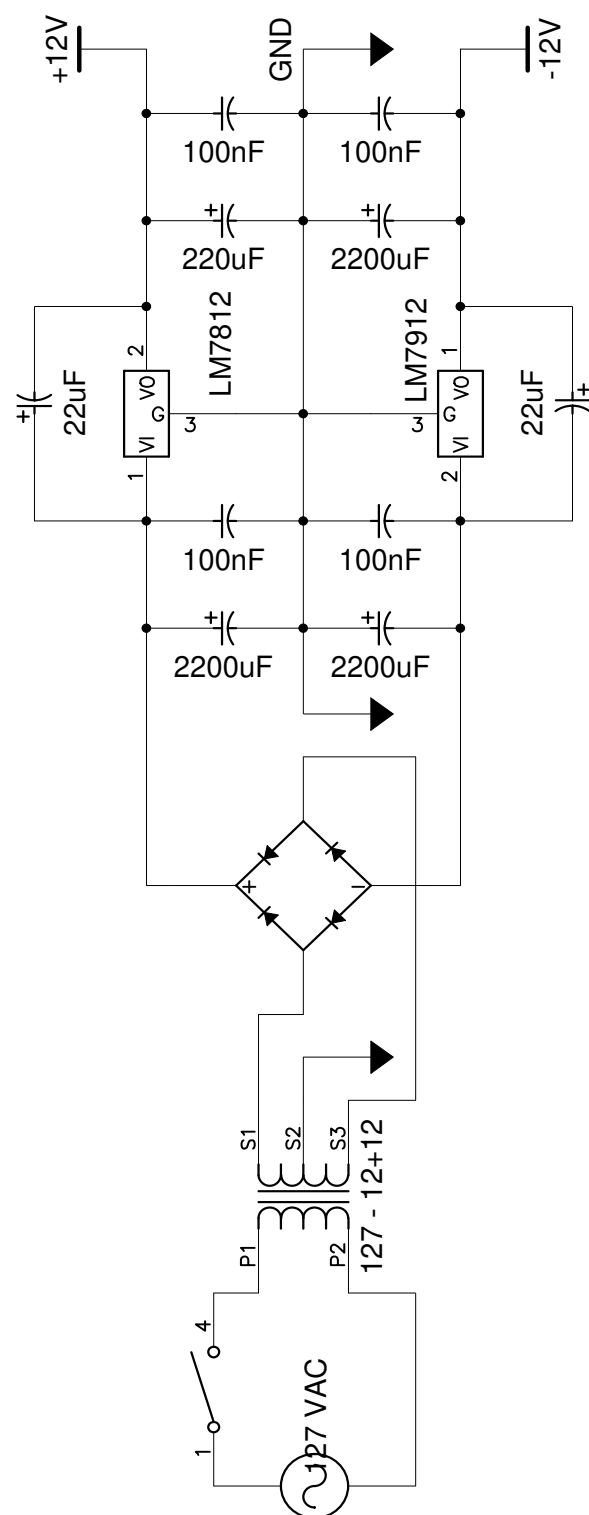


Figura E.1 – Fonte de tensão contínua +12 Volts –12 Volts

## Apêndice F

### *Programa desenvolvido para a aquisição on-line dos dados provenientes do microfone e do transdutor de pressão.*

O programa de aquisição de dados foi desenvolvido em linguagem C. As tarefas executadas pelo programa estão especificadas no **Capítulo 4**.

#### AC500.C

```
/*                      PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS                      */
/* ----- */
/*     ESTE PROGRAMA FAZ A AQUISIÇÃO DOS DADOS PROVENIENTES DE     */
/*     1- MICROFONE          - CANAIS 1,3,5                          */
/*     1- TRANSDUTOR DE PRESSÃO - CANAL 6                            */
/* ----- */
/* Este programa faz a aquisição contínua de pontos utilizando uma média */
/* aritmética de 500 amostras por ponto                                  */
/* ----- */

#include "conio.h"
#include "dos.h"
#include "stdlib.h"
#include "stdio.h"
#include "graphics.h"
#include "ctype.h"
#include "math.h"
#include "bios.h"
#include "time.h"

#define ADLSB    0      /* Porta de leitura do lsb do conv ad      */
#define ADMSB    1      /* Porta de leitura do msb do conv ad      */
#define ADOFF    2      /* Porta para ajuste de offset             */
#define ADSTS    4      /* Porta de controle do modo de operacao  */
#define DAMSB    6      /* Porta de escrita do msb do conversor da */
#define DALSB    7      /* Porta de escrita do lsb do conversor da */
#define CTL      8      /* Porta de controle do mux de E/S e do sh */
#define base     0x220
#define IODIG    10     /* Entrada e saída digital                 */
#define TIMER0   12     /* Timer 0 do 8253                         */
#define TIMER1   13     /* Timer 1 do 8253                         */
#define TIMER2   14     /* Timer 2 do 8253                         */
#define TIMCTL   15     /* Porta de controle do 8253              */
#define TRUE     1
#define FALSE    0

/* ----- */
/*                      DEFINIÇÃO DOS BITS DE IMPORTÂNCIA            */
/* ----- */

#define BSHEAN    0x10   /* Bit de controle do sample-hold entanl (1=sample) */
#define BSHSA     0x08   /* Bit de controle do sample-holds das saidas (1=sample) */
```

```

#define EOC      0x80  /* bit de fim de conversao */
#define MASC0_5  0x00  /* Mascara no modo de operação 0-5V */
#define MASC1_5  0x29  /* Mascara no modo de operação 1-5V */
#define MASC0_4  0x08  /* Mascara no modo de operação 1-4V */
#define MASCBIP  0x23  /* Mascara no modo de operação BIPOLAR */
#define TIME_OUT 2     /* Tempo de espera do fim da conversão A/D */

char init_conv;

/* ----- */
/*          DECLARAÇÃO DAS VARIÁVEIS GLOBAIS E SUBROTINAS          */
/* ----- */

extern char erro;
unsigned char modoper;
unsigned int read_anl(), adj_offset();
unsigned char offset;
int get_key();
void leitura();
void grafico();
void eixos();
void arquivo();
void selchda();
void write_dig();

FILE *arq1;
int cont, count;
int tempo1, tempo2, tempo3;

/* ----- */
/*          PROGRAMA PRINCIPAL          */
/* ----- */

void main()
{
    clock_t clock();
    char arq[15];
    char loop, inicio, opcao, final, input;
    int i;
    float volt_trans[1600];
    int graphdriver = DETECT, graphmode;
    offset = adj_offset();
    clrscr();
    printf("\n Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos - UNICAMP \n\n");
    printf("\n\n\n Programa para detecção contínua de vazamento de gás \n ");
    printf(" em vasos de pressão \n\n\n\n\n ");
    printf("\n\n\n\n\n Pressione alguma tecla para continuar ");
    getch();
    clrscr();

    tempo1=0;
    tempo2=0;
    tempo3=0;

    inicio:
    clrscr();
    printf("\n Dê o nome do arquivo de dados : ");
    scanf("%s", &arq);
    arq1 = fopen(arq, "w+");
    fprintf(arq1, " ");
    fprintf(arq1, " ");
    fprintf(arq1, " Amplitude(Volts) \n");
    fprintf(arq1, "Pontos ");
    fprintf(arq1, "Tempo(s) ");
    fprintf(arq1, " Pressão(kgf/cm2) ");

```

```

fprintf(arql,"Filtro 1kHz      ");
fprintf(arql,"Filtro 5kHz      ");
fprintf(arql,"Filtro 9kHz  \n\n");
printf("\n\n\n\n\n\n\n\n      Aquisição de dados experimentais  ");
printf("\n\n\n Tecla <ENTER> para iniciar aquisição de dados ");
getch();
clrscr();
initgraph(&graphdriver,&graphmode,"c:\\tc2"); /* inic.do mod.gráfico */
cleardevice();
cont=0;          /* conta o número de pontos */
count=0;         /* conta o número de gráficos */

/* ----- */
/*                               INICIO DA AQUISIÇÃO DE DADOS                               */
/* ----- */

tempo1 = clock();

do
{
    if (cont == 0)
    {
        cleardevice();
        count=count+1;
        eixos();
        setttextjustify(1,0);
        setttextstyle(0,0,1);
        outtextxy(350,10," Para finalizar, aperte uma tecla");
    }
    cont = cont + 1;
    leitura();
    if (cont == 550)
        cont = 0; /* retorna ao início da contagem impedindo que o programa */
                  /* seja finalizado */
}

while (kbhit() == 0);
getch();
tempo3 = clock();
printf("Tempo total = %.6f", (tempo3-tempo1)/CLK_TCK);
while(kbhit()==0);
getch();
closegraph();

}

/* ----- */
/*                               SUBROTINA DE LEITURA E FILTRAGEM DE DADOS                               */
/* ----- */

void leitura()
{
    int i,j,ix,iy,pnt,ponto;
    char buf;
    float tempo,soma0,soma1,soma2,soma3,soma4;
    float P0,P1,P2,P3,P4,P5,P6;
    pnt=500; /* Média aritmética de 500 aquisições por ponto */

/* LEITURA DOS DADOS */

    soma0 = 0.0;
    soma1 = 0.0;
    soma2 = 0.0;
    soma3 = 0.0;

```

```

soma4 = 0.0;

for(j=0; j<pnt; j++)
{
    soma0 = read_anl(1,offset);
    soma0 = read_anl(1,offset);
    soma0 = read_anl(1,offset);
    soma0 = read_anl(1,offset);
    soma1 = soma1 + read_anl(1,offset);      /* Filtro 1kHz */

    soma0 = read_anl(3,offset);
    soma0 = read_anl(3,offset);
    soma0 = read_anl(3,offset);
    soma0 = read_anl(3,offset);
    soma2 = soma2 + read_anl(3,offset);      /* Filtro 5kHz*/

    soma0 = read_anl(5,offset);
    soma0 = read_anl(5,offset);
    soma0 = read_anl(5,offset);
    soma0 = read_anl(5,offset);
    soma3 = soma3 + read_anl(5,offset);      /* Filtro 9kHz*/

    soma0 = read_anl(6,offset);
    soma0 = read_anl(6,offset);
    soma0 = read_anl(6,offset);
    soma0 = read_anl(6,offset);
    soma0 = read_anl(6,offset);
    soma4 = soma4 + read_anl(6,offset);      /* Transdutor de Pressão*/
}

P0 = 5*((soma1/pnt)/(4095.0))-0.046;
P1 = 5*((soma2/pnt)/(4095.0))-0.051;
P2 = 5*((soma3/pnt)/(4095.0))-0.042;
P3 = 20*(((soma4/pnt)-1012)/((4095.0)-1012))-0.0122;

tempo2 = clock();
ponto=(count-1)*550+cont;
tempo=(tempo2-tempo1)/CLK_TCK;

/* Salva os dados amostrados num arquivo contínuo */
fprintf(arq1,"%int      ",ponto);
fprintf(arq1,"%f        ",tempo);
fprintf(arq1,"%f        ",P3);
fprintf(arq1,"%f        ",P0);
fprintf(arq1,"%f        ",P1);
fprintf(arq1,"%f        \n",P2);

/* imprime continuamente no gráfico */

ix =cont + 40;                      /* coordenada x          */
iy = 220.0 -40.0*P0;                /* coordenada y          */
putpixel(ix,iy,13);                 /* introdução do ponto P0 */

ix =cont + 40;                      /* coordenada x          */
iy = 220.0 - 40*P1;                 /* coordenada y          */
putpixel(ix,iy,25);                 /* introdução do ponto P1 */

ix =cont + 40;                      /* coordenada x          */
iy = 220.0 - 40*P2;                 /* coordenada y          */
putpixel(ix,iy,26);                 /* introdução do ponto P2 */

```

```

        ix = cont + 40;
        iy = 450.0 - 20*P3;
        putpixel(ix,iy,14);
    }

/* ----- */
/*          CONSTRUÇÃO DOS EIXOS X E Y          */
/* ----- */

void eixos()
{
    char buf;
    double ticx,ticy;
    int i,ix,ixx,iy;

    settextjustify(1,0);
    settextstyle(0,0,1);

    line(40,10,40,220);
    line(40,250,40,450);
    line(40,220,620,220);
    line(40,450,620,450);

    for(i=0;i<=300;i=i+50)
    {
        ix = i + 40;
        line(ix,218,ix,222);
        ticx = 1.0*i+300*(count-1);
        gcvt(ticx,3,&buf);
        outtextxy(ix+2,235,&buf);
        ixx = i + 40;
        line(ixx,448,ixx,453);
        ticx = 1.0*i+300*(count-1);
        gcvt(ticx,3,&buf);
        outtextxy(ix+2,465,&buf);
    }
    ticy = 6.0;
    for(i=0;i<=220;i=i+40)
    {
        iy = i+20;
        line(35,iy,40,iy);
        ticy = ticy - 1.0;
        gcvt(ticy,3,&buf);
        outtextxy(20,iy+4,&buf);
    }
    ticy = 11.0;
    for(i=240;i<=450;i=i+20)
    {
        iy = i+10;
        line(35,iy,40,iy);
        ticy = ticy - 1.0;
        gcvt(ticy,3,&buf);
        outtextxy(20,iy+4,&buf);
    }
    settextjustify(1,0);
    settextstyle(0,0,1);
    outtextxy(600,475,"Pontos");
    setcolor(13);
    outtextxy(550,50,"Filtro 1kHz");
    setcolor(25);
    outtextxy(550,70,"Filtro 5kHz");
}

```

```

    setcolor(26);
    outtextxy(550,90,"Filtro 9kHz");
    setcolor(15);
    setttextjustify(1,0);
    setttextstyle(0,0,1);
    outtextxy(600,245,"Pontos");
    setttextjustify(1,1);
    setttextstyle(0,1,1);
    outtextxy(4,100,"Amplitude (V)");
    setttextjustify(1,1);
    setttextstyle(0,1,1);
    outtextxy(4,340,"Pressão (kgf/cm2)");
}

/* ----- */
/*          SUBROTINA DE SELEÇÃO DO ACIONAMENTO DE TECLAS          */
/* ----- */

int get_key(void)
{
    int key,lo,hi;
    key = bioskey(0);
    lo = key & 0X00FF;
    hi = (key & 0XFF00) >> 8;
    return((lo == 0) ? hi + 256 : lo);
}

/* ----- */
/*          INÍCIO DAS ROTINAS DE TRATAMENTO DA  AD/DA          */
/* ----- */

start_ad (start)
char start;
{
    init_conv = start;
    outportb (base + ADSTS , start);
}
/* ----- */
/*          Seleção do canal do mux de entrada e saída          */
/* ----- */

sel_canal ( canal )
unsigned char canal;
{
    selchad( canal );
    selchda( canal );
}

/* ----- */
/*          SELEÇÃO DO CANAL DO MUX DA ENTRADA E DA SAMPLE NA ENTRADA          */
/* ----- */

selchad(canlal)
unsigned char canal;
{
    unsigned char chad;
    chad = canal << 5;          /* Posiciona o end do mux (badchan) */
    chad &= 0xe0;              /* Isola somente badchan0-2          */
    outportb(base + CTL,chad); /* Seleciona o canal                  */
    modoper |= BSHEAN;         /* Introduz bit de sample             */
    outportb(base + ADSTS,modoper); /* Sample-hold da inanl em sample    */
    modoper &= ~BSHEAN;        /* Retira bit de sample              */
    outportb(base + ADSTS,modoper); /* Sample-hold da inanl em hold      */
    return(canal);
}

```

```

}

/* ----- */
/*          SELECIONA O CANAL DO MUX DE SAÍDA E DA SAMPLE NA SAÍDA          */
/* ----- */

void selchda(unsigned char canal)
{
    unsigned char chda;
    canal &= 0x07;           /* Isola */
    chda = (canal << 5);      /* Posiciona o end do mux (badchan0-2) */
    chda |= canal;           /* Soma c/ o mux do sample-hold (badchan0-2) */
                             /* Seleciona o canal+sample-hold corresp */
    chda |= BSHSA;           /* Introduz o bit de sample */
    outportb(base + CTL, chda); /* Coloca o sample-hold do canal em sample */
}

/* ----- */
/*          ROTINA DE ESPERA DO FIM DA CONVERSÃO          */
/* ----- */

wait_eoc()
{
    unsigned register int ciclos, status;
    for (ciclos = TIME_OUT; ciclos; ciclos --)
    {
        status = inportb (base + ADSTS );
        if (! (status & EOC))
            return (TRUE);
    }
    return (FALSE);
}

/* ----- */
/*          ROTINA DE LEITURA DO CONVERSOR          */
/*          Parâmetro de entrada: numero do canal          */
/*          Parâmetro de saída:  retorna o valor da conversao          */
/*          se ocorrer erro retorna -1          */
/* ----- */

unsigned int read_anl(unsigned char canal, unsigned char offset)
{
    unsigned int dadols, dadoms;
    unsigned int dado;
    selchad(canal);
    outportb(base+ADOFF, offset); /* Normalisa o valor do offset */
    dadols = inportb(base+ADLSB); /* Envia o start ao ad */
    wait_eoc(); /* Delay para conversao */
    dadoms = inportb(base+ADMSB); /* Le os 4 bits mais significativos */
    dadols = inportb(base+ADLSB); /* Le os 8 bits menos significativos */
    dado = (dadoms << 8) + dadols;
    return(dado);
}

/* ----- */
/*          ESCRIVE O VALOR DE DADO NA SAÍDA ANALÓGICA DE 'canal'          */
/* ----- */

write_anl(unsigned int dado, unsigned char canal)
{
    unsigned char dadols, dadoms;
    dadols = dado; /* Inicia o deslocamento do dado */
    dadoms = dado >> 8; /* Desloca os 2 bits mais signific. */
    outportb(base + DALSB, dadols); /* Escreve byte menos significativo */
}

```

```

        outportb(base + DAMSB,dadoms);    /* Escreve byte mais significativo */
        selchda(canal);                    /* Trans. para o canal de s. desejado */
    }
/* ----- */
/*                               ESCREVE NAS ENTRADAS DIGITAIS                               */
/* ----- */

void write_dig(char dado)
{
    outportb(base + IODIG,dado);
}

/* ----- */
/*                               ALGORITMO PARA AJUSTE AUTOMATICO DE OFFSET                               */
/* ----- */

/*                               Retorna os seguintes valores:                               */
/*                               100h -> Se não existe o sinal de referência de 3.500V na          */
/*                               entrada analógica 7                                         */
/*                               200h -> Se em 4 tentativas de ajustar o offset isto não         */
/*                               for conseguido                                              */
/*                               Num -> De 0h a 0FFh que e o valor p/ zerar o offset          */
/* ----- */
unsigned int adj_offset()
{
    unsigned int in1,in2,i,inatual,trigger = 0x800;
    unsigned char flag = 0,delay;
    if(modoper & 0x01)                    /* modo 1 a 5V? */
    trigger = 0xa00;                        /* sim, armazene a00h como valor de comparação */
    else
    trigger = 0xb33;
    inatual = read_anl(7,140);             /* lê a entrada de refer centrando o offset */
    if(inatual < (trigger - 0x100))         /* existe a referencia de (3500mV)? */
    return(0x100);                         /* nao, retorne uma condição de erro */
    for(i=0;flag==0;++i)                   /* inicio do integ. p/ busca do ponto ótimo */
    {
        inatual = read_anl(7,(i&0xff));     /* tente com i valor de offset */
        for(delay=0;delay<50;++delay)     /* rotina para atraso */
        if(inatual == trigger)             /* erro de leitura =zero? */
        flag = 1;                          /* termine a execução pto encontrado */
        if(i == 0x400)                     /* feita o scan 4 vezes sem sucesso? */
        return(0x200);                     /* termine e retorne condição de erro */
    }
    return(i-1);                          /* termine e retorne o valor ajustado */
}

/* ----- */
/*                               ROTINA PARA SELEÇÃO AUTOMÁTICA DO MODO DE OPERAÇÃO                               */
/*                               ACEITA OS SEGUINTE PARÂMETROS:                               */
/* ----- */

/*                               n = 0 -> 0-5V (modo default)                               */
/*                               n = 1 -> 1-5V                                             */
/*                               n = 2 -> 0-4V                                             */
/*                               n = 3 -> bipolar                                           */

/*                               OBS: modo de leitura do conversor: pooling                               */
/* ----- */

modo_oper(char n)
{
    unsigned char masc;
    masc=MASC0_5;                          /* default operacao bipolar */
    switch(n)                              /* scan do modo de operação alternativo */
    {
        case 1:

```

```

        masc = MASC1_5;
        break;
    case 2:
        masc = MASC0_4;
        break;
    case 3:
        masc = MASCBIP;
        break;
}
modoper = masc;          /* armazena o modo de operação setado */
outportb(base+ADSTS,masc); /* envia a placa */

/* ----- */

```