

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**Detecção de Vazamentos em Tubulações
Através de Método Acústico e da Análise
de Transientes de Pressão**

Autora: Elisângela Orlandi de Sousa

Orientadora: Prof^a.Dra. Sandra Lúcia da Cruz

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, na área de concentração em Sistemas de Processos Químicos e Informática.

Campinas, SP, Brasil.
Fevereiro, 2007

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

So85d Sousa, Elisângela Orlandi de
Detecção de vazamento em tubulações através de método
acústico e da análise de transientes de pressão. / Elisângela
Orlandi de Sousa.--Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Sandra Lúcia da Cruz
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Detectores de vazamentos. 2. Gás – Vazamento. 3.
Materiais acústicos. 4. Gás – Tubulações. I. Cruz, Sandra
Lúcia da. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Leak detection in pipelines through acoustic method and
pressure transient analysis

Palavras-chave em Inglês: Leak detection, Acoustic method, Pipeline
networks

Área de concentração: Processos Químicos e Informática

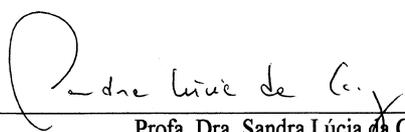
Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Eliana Luci Ligerio e João Alexandre da Rocha Pereira

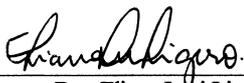
Data da defesa: 27/02/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 27 de Fevereiro de 2007 pela banca
examinadora constituída pelos professores doutores:



Prof.ª. Dra. Sandra Lúcia da Cruz
Orientadora

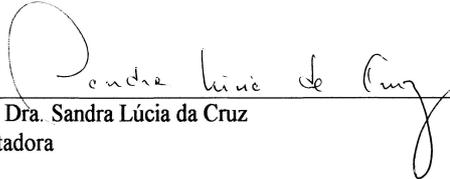


Dra. Eliana Lúci Ligerio
Titular



Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira
Titular

Esta versão corresponde à redação final da dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida por Elisângela Orlandi de Sousa e aprovada pela Comissão Julgadora em 27/02/07.


Prof. Dra. Sandra Lúcia da Cruz
Orientadora

Dedico este trabalho com todo meu amor aos meus pais Aparecido e Hélia, meu irmão Luiz Gustavo e meu namorado Tiago por terem me incentivado nos estudos e por darem todo o apoio que precisei, mostrando sempre que determinação, perseverança e paciência são as chaves para o sucesso.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me dar confiança e forças para superar as dificuldades encontradas.

À minha família, tios, tias, primos e primas, que mesmo distante me acompanharam e me apoiaram.

À meu namorado Tiago que me incentivou em todos os momentos

À professora Sandra Lúcia da Cruz pela amizade, orientação, paciência e dedicação e principalmente pelo exemplo de vida.

Aos professores do Departamento de Sistemas de Processos Químicos e Informática que direta ou indiretamente colaboraram para execução deste trabalho.

Às minhas amigas de república Ângela, Cíntia, Maristela e Sueli por serem aqui minha família e amigas, pelos momentos de alegria e companheirismo.

Às minhas amigas Cássia, Dani, Fabiana, Grazi, Márcia, Mari e Mariana que mesmo longe, sempre estiveram presentes na minha vida me apoiando e me ajudando desde a graduação.

À minha sogra Ana Maria e cunhadas Juliana, Viviana e Mariana pela amizade e apoio.

Aos meus companheiros e parceiros de mestrado Anderson e Paulo, pela amizade e apoio nas horas difíceis.

A meu companheiro de mestrado, amigo, César (em memória) que foi embora cedo demais e deixou saudades.

Aos novos amigos que encontrei no DESQ pelo companheirismo.

Ao Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos - FEQ- UNICAMP pela oportunidade de continuar os meus estudos.

Aos funcionários da Alternativa por deixarem nosso ambiente de trabalho mais agradável e limpo.

Ao funcionário do DESQ Juliano pela ajuda nos “problemas de computador”.

À secretária do DESQ Walquiria, pela atenção.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP pela colaboração ao desenvolvimento deste trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Enfim, a todos que mesmo não sendo citados aqui estiveram envolvidos com o desenvolvimento desta tese, os meus sinceros agradecimentos.

"...talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor, mas
lutamos para que o melhor fosse feito...
...não somos o que deveríamos ser, mas somos o que iremos
ser, mas graças a Deus, não somos o que éramos..."

Martin Luther King

RESUMO

Sousa, E.O. *Detecção de Vazamentos em Tubulações através do Método Acústico e da Análise de Transientes de Pressão*. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2006. Tese (mestrado).

Redes de tubulação são sistemas complexos de dutos utilizados no transporte de fluidos a longas distâncias. Um pequeno vazamento em uma tubulação pode provocar grandes perdas de produtos e sérios danos ao meio ambiente até serem detectados. Com o propósito de prevenir vazamentos em tubulações, várias técnicas são relatadas na literatura. Este trabalho descreve o desenvolvimento e teste de uma técnica de detecção de vazamento de gás em tubulação baseada no método acústico e na análise de transientes de pressão gerados a partir do vazamento. Transientes de pressão e o ruído sonoro gerado pelo vazamento foram detectados e analisados em uma tubulação operando sem e com escoamento contínuo de gás (ar) em várias condições de operação. O trabalho experimental utilizou um vaso de pressão de 34,5 litros e uma tubulação com 60 m de comprimento e 1/2" de diâmetro. A pressão de operação variou de 2 a 7 kgf/cm². Vazamentos de várias magnitudes foram simulados através de um orifício localizado na tubulação cujo diâmetro variou entre 0,4 mm a 5 mm. O microfone e o transdutor de pressão foram instalados no vaso de pressão ou na tubulação para detectar a ocorrência de vazamento, ambos conectados a um computador PC através de um conversor ADA. O sinal gerado pelo microfone foi amplificado e passou por um banco de filtros passa faixa sendo transformado em três sinais com amplitudes independentes, cada uma com uma faixa de frequência específica de 1kHz, 5kHz e 9kHz. O programa de aquisição de dados foi escrito em linguagem C para ler e processar os dados. Os resultados experimentais mostraram que é possível detectar vazamentos em tubulações através do método acústico. A análise dos sinais de amplitude para frequências diferentes mostrou que o ruído sonoro gerado pelo vazamento depende da magnitude do vazamento e da pressão na tubulação. Em todos os experimentos a ocorrência de vazamento foi prontamente detectada pelo microfone

enquanto as mudanças nos perfis de transientes de pressão não eram sempre significativas para detectar o vazamento.

Palavras-chave: detecção de vazamentos, método acústico, redes de tubulação.

ABSTRACT

Sousa, E.O. *Leak Detection in Pipelines through Acoustic Method and Pressure Transient Analysis*. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2006. Tese (mestrado).

Pipeline networks are complex systems of ducts used in the fluid transportation through long distances. Even small leaks in a pipeline can lead to great losses of product and serious damages to the environment before it could be detected. With the purpose of preventing leakage in pipelines, various techniques have been reported in the literature. This work describes the development and test of a gas leak detection technique in pipelines based on an acoustic method and on the analysis of pressure transients generated by the leak. Pressure transients and the noise generated by leakage have been detected and analysed in a pipeline operating with and without continuous flow of gas (air) under various operation conditions. The experimental setup made use of a 34,5 liters pressure vessel and a 60 m long, ½” in diameter pipeline. The operational pressure varied from 2 to 7 kgf/cm². Leakages of various magnitudes were simulated through an orifice located in pipeline whose diameter varied from 0,4 mm to 5,0 mm. A microphone and a pressure transducer were installed either in the pressure vessel or in the pipeline to detect leak occurrence, both being connected to a PC computer through an ADA converter. The signal generated by the microphone was amplified and also passed through a bank of band pass filters being transformed into three signals with independent amplitude, each one with a band of specific frequency of 1 kHz, 5 kHz and 9 kHz. The data acquisition software was written in C language to read and process all data. The experimental results showed that it is possible to detect leaks in pipelines based on acoustic method. The analysis of the signal amplitude for different frequencies showed that the noise signal generated by leakage depend on both leak magnitude and pressure in the pipeline. In all experiments leak occurrence was readily detected by the microphone while the changes in pressure transient profiles were not always significant to detect the leak.

Keywords: leak detection, acoustic method, pipeline networks.

SUMÁRIO

| | |
|--|--------------|
| <i>RESUMO</i> | <i>XIII</i> |
| <i>ABSTRACT</i> | <i>XV</i> |
| <i>SUMÁRIO</i> | <i>XVII</i> |
| <i>LISTA DE FIGURAS</i> | <i>XIX</i> |
| <i>LISTA DE TABELAS</i> | <i>XXIII</i> |
| <i>NOMENCLATURA</i> | <i>XXV</i> |
| 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 - Objetivos | 5 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 7 |
| 2.1 – Principais métodos para a detecção de vazamentos | 7 |
| 2.2 – Detecção de vazamentos por computador on-line | 15 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 31 |
| 3.1 - Montagem do Protótipo | 32 |
| 3.2 – Especificação dos equipamentos | 35 |
| 3.3 – Sistema de aquisição de dados | 36 |
| 3.3.1 – Sensores e Transdutores | 36 |
| 3.3.2 – Condicionador de Sinais | 36 |
| 3.3.3 – Placa Conversora ADA | 37 |
| 3.3.4 – Microcomputador | 37 |
| 3.3.5 – Programa de Aquisição de Dados | 37 |
| 3.3.6 – Conversão do Sinal Analógico em Digital | 39 |
| 3.3.7 – Conversão do sinal analógico proveniente do microfone | 39 |
| 3.3.8 – Conversão do sinal analógico proveniente do transdutor de pressão | 40 |
| 3.3.9 – Temporização do programa de aquisição de dados | 40 |

| | |
|--|-------------------------------|
| 3.3.10 – Filtragem de dados | 41 |
| 3.4 – Detecção de vazamentos. Condições de operação do sistema vaso- tubulação..... | 41 |
| 3.4.1 – Detecção de vazamento sem alimentação contínua de ar..... | 41 |
| 3.4.2 – Detecção de vazamento com alimentação contínua de ar | 42 |
| 3.5 – Procedimento Experimental | 43 |
| 3.5.1 – Tubulação sem alimentação contínua de ar | 43 |
| 3.5.2 – Tubulação com alimentação contínua de ar..... | 44 |
| 4 . RESULTADOS E DISCUSSÃO | 47 |
| 4.1 – Detecção de vazamentos sem alimentação contínua de ar | 47 |
| 4.1.1 – Transdutor de pressão e microfone instalados no vaso de pressão..... | 47 |
| 4.1.2 - Transdutor de pressão e microfone instalados à entrada da tubulação..... | 53 |
| 4.2 – Detecção de vazamentos com alimentação contínua de ar..... | 59 |
| 4.2.1 – Transdutor de pressão e microfone instalados no vaso de pressão..... | 59 |
| 4.2.2 – Transdutor de pressão e microfone instalados à entrada da tubulação | 64 |
| 5 . CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... | 71 |
| 5.1 Conclusões | 72 |
| 5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros..... | Erro! Indicador não definido. |
| 6 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 75 |
| APÊNDICE A – TRANSIENTES DE PRESSÃO E AMPLITUDE DO RUÍDO SONORO CAUSADOS POR DIVERSOS TIPOS DE VAZAMENTOS EM UMA TUBULAÇÃO SEM ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA DE AR..... | 79 |
| APÊNDICE B – TRANSIENTES DE PRESSÃO E AMPLITUDE DO RUÍDO SONORO CAUSADOS POR DIVERSOS TIPOS DE VAZAMENTOS EM UMA TUBULAÇÃO COM ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA DE AR. | 107 |
| APÊNDICE C – PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA AQUISIÇÃO ON-LINE DOS DADOS PROVENIENTES DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO E DO MICROFONE.... | 125 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Principais Gasodutos Brasileiros. (Fonte: http://www.antt.gov.br) | 3 |
| Figura 2.1: Perfis dos gradientes de pressão obtidos por Naves (1991). | 16 |
| Figura 2.2. Vazamento entre T1 e T2. Re 9000 (BUIATTI, 1995). | 17 |
| Figura 2.3. Esquema de uma tubulação com vazamento entre os transdutores 2 e 3.. | 18 |
| Figura 2.4. Influência do número de Reynolds e magnitude do vazamento na onda (CARIATTI, 1999). | 20 |
| Figura 2.5. Perfis de pressão obtidos por Cariatti (1991). | 21 |
| Figura 2.6. Transientes de pressão em tubulação isolada para orifícios de 1 a 5 mm (MACIAS, 2004). | 24 |
| Figura 2.7. Comparação entre transientes de pressão, tubulação 6 e 60m, orifício 5mm (MACIAS, 2004). | 24 |
| Figura 2.8. Transientes de pressão em tubulação com escoamento (MACIAS, 2004). | 25 |
| Figura 2.9. Transientes de pressão em tubulação com escoamento; vazamento de 1 s (MACIAS, 2004). | 25 |
| Figura 2.10. Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro, orifício 0,8mm (PAVAN, 2005). | 27 |
| Figura 2.11. Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro, orifício 2,0 mm (PAVAN, 2005). | 27 |
| Figura 2.12. Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro, orifício 0,8 mm (PAVAN, 2005). | 28 |
| Figura 2.13. Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro, orifício 2,0 mm (PAVAN, 2005). | 29 |
| Figura 3.1 – Esquema da tubulação com transdutor e microfone localizados no vaso de pressão. | 32 |
| Figura 3.2 – Esquema da tubulação com transdutor e microfone localizados no início da tubulação. | 32 |
| Figura 4.1 - Foto ilustrativa do sistema de detecção de vazamento. | 33 |
| Figura 4.2 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 0,4 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão. | 48 |
| Figura 4.3 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão. | 48 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 4.4 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,5 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão..... | 49 |
| Figura 4.5 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 2,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão..... | 50 |
| Figura 4.6 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 3,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão..... | 50 |
| Figura 4.7 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 4,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão..... | 52 |
| Figura 4.9 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 5,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão..... | 52 |
| Figura 4.9 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 0,8 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 53 |
| Figura 4.10 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 54 |
| Figura 4.11 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,5 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 55 |
| Figura 4.12 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 2,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 56 |
| Figura 4.13 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 3,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 57 |
| Figura 4.14 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 4,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 57 |
| Figura 4.15 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 5,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 58 |
| Figura 4.16 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão..... | 60 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 4.17 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,5 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão..... | 60 |
| Figura 4.18 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 2,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão..... | 61 |
| Figura 4.19 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 3,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão..... | 62 |
| Figura 4.20 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 4,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão..... | 63 |
| Figura 4.21 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 5,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão..... | 63 |
| Figura 4.22 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 65 |
| Figura 4.23 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,5 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 66 |
| Figura 4.24 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 2,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 66 |
| Figura 4.25 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 3,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 68 |
| Figura 4.26 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 4,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 68 |
| Figura 4.27 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 5,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação..... | 69 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| Tabela 2.1 – Precisão na localização de vazamentos (SILVA, 1996). | 19 |
| Tabela 2.2 – Estudos sobre técnicas de detecção e localização de vazamentos por métodos computacionais on-line realizados no DESQ. | 30 |

NOMENCLATURA

Letras Latinas

| | |
|----------------------|---|
| A | amplitude do filtro analógico |
| L₁ | distância entre os transdutores 1 e 2 (m) |
| L₂ | distância entre os transdutores 2 e 3 (m) |
| L₃ | distância entre os transdutores 3 e 4 (m) |
| t₁ | tempo de detecção do transdutor T1 |
| t₂ | tempo de detecção do transdutor T2 |
| t₃ | tempo de detecção do transdutor T3 |
| t₄ | tempo de detecção do transdutor T4 |
| v | velocidade do fluido (m/s) |
| Y | distância do vazamento ao transdutor a jusante (m) |

Abreviaturas e Siglas

| | |
|------------------------|---|
| ADA | Analógico-Digital-Analógico |
| CAD | Conversor Analógico-Digital |
| ND | Número decimal |
| ND_{eq} | Número decimal equivalente à tensão de entrada |
| PRODUT | Programa Tecnológico de Dutos |
| Re | Número de Reynolds |
| SA | Sinal Analógico |
| SCADA | Supervisory Control and Data Acquisition |
| SD | Sinal Digital |

- T1 Transdutor 1**
- T2 Transdutor 2**
- T3 Transdutor 3**
- T4 Transdutor 4**

1 - INTRODUÇÃO

Redes de tubulações são construídas em todo o mundo para realizar o transporte de diferentes tipos de produtos de refinarias, campos de petróleo e bases de distribuição. Elas são consideradas o melhor meio de transporte de fluidos e gases a longas distâncias por apresentarem a forma mais segura e econômica quando comparadas com os transportes rodoviário, ferroviário e marítimo.

Visando a melhoria dos níveis de segurança, confiança, eficiência e efetividade de operação, grandes recursos têm sido investidos para o desenvolvimento de novas tecnologias para a atividade dutoviária em todo o mundo.

A utilização de tubulações para o transporte de fluidos líquidos não é recente. Na Europa só no final do século XIX é que o gás natural passou a ser utilizado em maior escala no transporte dutoviário, no entanto, as técnicas de construção eram modestas e os gasodutos tinham no máximo 160 km de extensão, impedindo o transporte de grandes volumes a longas distâncias.

Nos Estados Unidos, o primeiro gasoduto com fins comerciais entrou em operação em 1821. Em 1931 já existiam mais de 10 linhas de transmissão de grande porte, mas sem alcance interestadual. A partir de então, principalmente até 1960, milhares de quilômetros de dutos foram instalados, graças aos avanços em metalurgia, técnicas de soldagem e construção de tubos, passando a serem utilizados em grande escala em vários países devido às vantagens econômicas e ambientais. (Fonte: <http://www.gaspetro.com.br/gas.htm>, 2005).

No Brasil, a década de 80 caracterizou-se pela construção de um grande número de gasodutos devido ao aumento da utilização do gás natural nas indústrias. O avanço tecnológico viabilizou uma melhor qualidade do projeto, construção e supervisão de oleodutos e gasodutos terrestres e marítimos apenas nos anos 90.

Em 1998, a Petrobras criou o PRODUT – Programa Tecnológico de Dutos com o objetivo de disponibilizar e desenvolver tecnologias para o sistema dutoviário, tendo por finalidade aumentar a confiabilidade operacional dos dutos, minimizando riscos de vazamentos, impactos no meio ambiente e perdas de capacidade de transporte; melhoria do

desempenho operacional, com maior aproveitamento dos ativos como garantia da qualidade do produto transportado; e minimização dos custos de operação e de investimentos. (Fonte: <http://www.gaspetro.com.br/gas.htm>, 2005).

A maioria dos gasodutos se enquadra em três grupos: transferência, transporte e distribuição. As tubulações de transferência levam o gás das áreas de produção até as plantas de processamento e normalmente este gás sai da fonte com pressão suficiente para ser transportado até a planta de processamento. O gás é tratado e adequado às condições de consumo. Hidrocarbonetos líquidos são fracionados para serem comercializados; gases ácidos, sulfeto de hidrogênio ou dióxido de carbono são removidos quando presentes, e o gás ainda é submetido a um processo de desidratação que remove a água até um limite aceitável, que normalmente é de 7 libras /milhões de pés cúbicos.

Tubulações de transporte levam o gás da estação de tratamento até as redes de distribuição. Compressores, no início da linha, proporcionam energia para movimentar o gás pela tubulação. Estações compressoras ao longo do trajeto são necessárias para manter a alta pressão adquirida. As tubulações de transportes são feitas de tubos de aço e são enterradas abaixo da superfície. As seções individuais são unidas por solda, e o tubo é revestido externamente para proteger contra a corrosão. As tubulações normalmente transportam gás por centenas, ou até milhares de quilômetros e o diâmetro normalmente é de 60 polegadas ou mais.

As tubulações de distribuição são consideradas a etapa final do sistema de fornecimento, ou seja, quando o gás chega ao consumidor para uso industrial, automotivo, comercial ou residencial. Nesta fase, o gás atende a padrões rígidos de especificação, e está isento de contaminantes. Quando necessário deverá estar odorizado para ser detectado facilmente em caso de vazamento (KENNEDY, 1993).

Para o consumidor residencial o investimento financeiro possibilitará a redução de até 40% dos custos com gás de cozinha e chuveiro. No comércio, o gás natural é empregado em fornos e fogões de padarias, lanchonetes, restaurantes e hotéis, existindo apenas um custo com a conversão dos equipamentos. Para indústria, o gás natural oferece vantagens econômicas, ambientais e operacionais. A economia é um dos principais atrativos e em alguns casos pode chegar a 55%. Além disso, a limpeza, versatilidade e alto

rendimento são algumas das razões que tornam o combustível útil nos processos de geração de calor e frio, aquecimento de água e ambiente, abastecimento de frota de veículos, geração de vapor, co-geração de energia elétrica, tudo sem a necessidade de armazenagem, utilização de equipamentos anti-poliuição e risco de interrupção no fornecimento. (Fonte: <http://www.gasnet.com.br>, 2006).

A Figura 1.1 mostra os principais gasodutos brasileiros interligados na América do Sul.

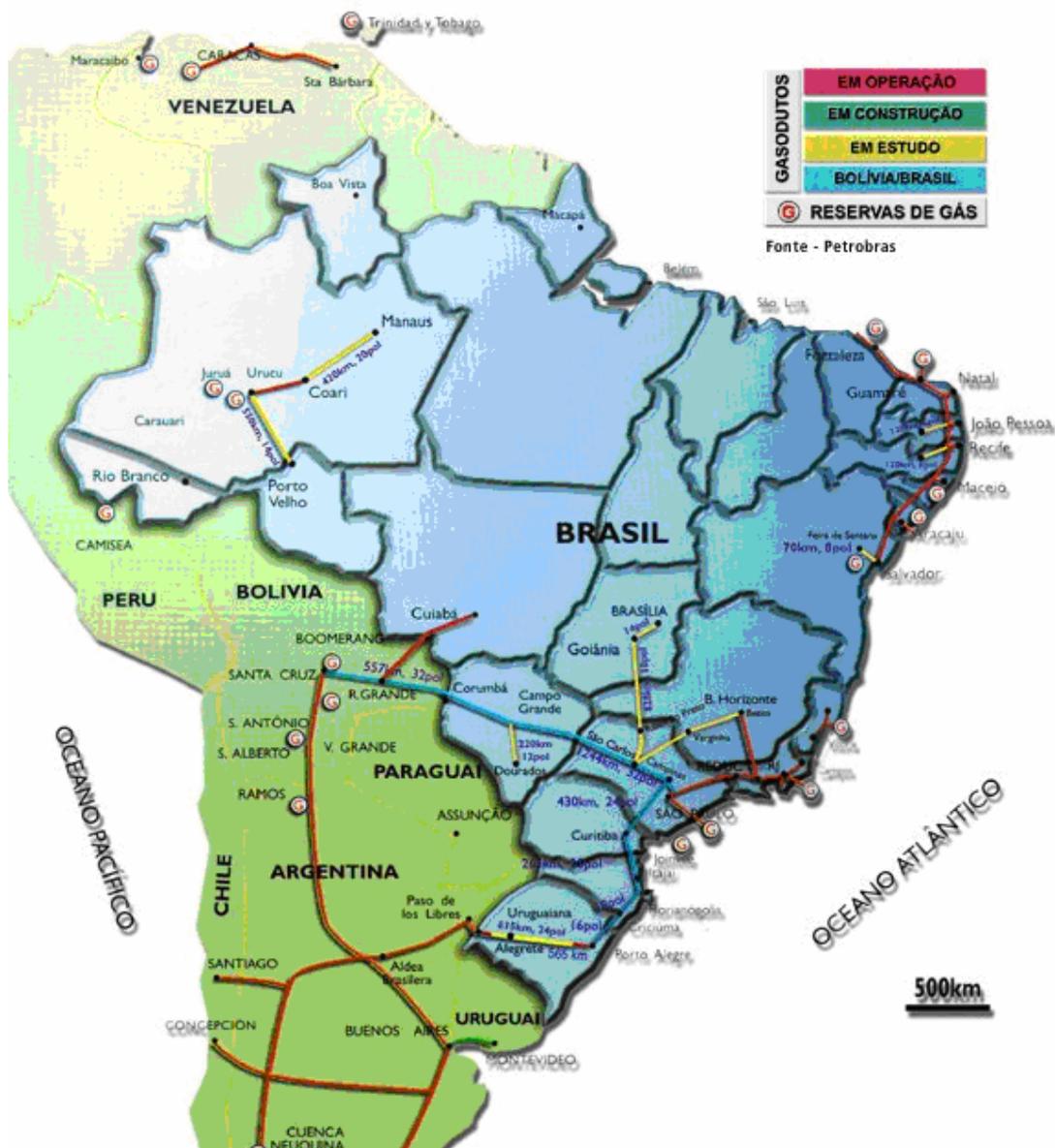


Figura 1.1: Principais Gasodutos Brasileiros. (Fonte: <http://www.antt.gov.br>)

1.1 - Objetivos

Considerando a importância dos sistemas de detecção e localização de vazamentos em tubulações, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e teste de uma técnica de detecção de vazamentos, baseada na análise da amplitude do ruído sonoro e do transiente de pressão gerados por vazamentos em uma tubulação transportando gás.

A montagem experimental foi constituída de um vaso de pressão de 34,5 litros conectado a uma tubulação de 60 m de comprimento, operando com ar comprimido a pressões entre 1 e 7 kgf/cm². Vazamentos de gás foram simulados através de um orifício, cujo diâmetro variou entre 0,4 mm e 5,0 mm, instalado em uma saída lateral na entrada da tubulação.

Um microfone e um transdutor de pressão foram instalados no vaso de pressão ou na tubulação e conectados a um microcomputador PC através de uma placa conversora Analógica/Digital/Analógica (ADA). O sinal proveniente do microfone foi compatibilizado com aquele compreendido pela placa ADA através de um circuito elétrico que apresentava duas etapas, na primeira o sinal alternado foi amplificado e na segunda o sinal passou por filtros passa faixa, de 1kHz, 5kHz e 9kHz, gerando três sinais contínuos em diferentes faixas de frequência. A aquisição de dados em tempo real foi realizada através de um programa em linguagem C.

As características da amplitude do ruído sonoro e do transiente de pressão gerados pela ocorrência de vazamento foram analisadas para diversas condições de operação: a) pressão na tubulação; b) magnitude do vazamento; c) posição do microfone e do transdutor de pressão. O estudo foi realizado em duas etapas: 1) detecção de vazamentos sem alimentação contínua de ar e 2) detecção de vazamentos com alimentação contínua de ar, para a tubulação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Vazamentos em redes de tubulações podem ocorrer devido a diversos fatores como escavações desavisadas no entorno de redes de gás, variações bruscas na pressão, ação corrosiva ou manutenção inadequada e conseqüentemente podem gerar sérios problemas de poluição ao meio ambiente, grandes prejuízos financeiros para a indústria bem como a interrupção no fornecimento do produto até que a tubulação seja reparada.

Deste modo, a operação adequada e segura de redes de tubulações requer um monitoramento permanente das condições operacionais da rede, de modo que na ocorrência de vazamentos estes possam ser identificados e localizados o mais rápido possível. São dois os tipos de vazamentos que ocorrem em redes de tubulações:

- Vazamento por “ruptura”: é o tipo de vazamento que menos ocorre, mas é muito perigoso devido a grande quantidade de produto derramado, podendo causar grandes prejuízos ambientais. Entretanto, estas rupturas são facilmente detectadas por serem acompanhadas de elevadas quedas de pressão e diferenças volumétricas (BAGHDADI, 1988).
- Vazamentos de pequenas proporções (< 5 litros/h): são vazamentos mais difíceis de serem detectados, portanto são igualmente perigosos porque podem provocar grandes perdas de produto até serem detectados. Podem ser ocasionada por corrosão, erosão, fadiga do material, falhas em soldas ou juntas (BAGHDADI, 1988).

2.1 – Principais métodos para a detecção de vazamentos

Nos últimos anos um grande número de sistemas de detecção de vazamento foi implantado em várias tubulações em operação. Infelizmente, muitos desses sistemas não apresentam desempenho satisfatório pelos seguintes motivos: geram freqüentes alarmes falsos, são de difícil entendimento para o usuário e a manutenção é muito cara.

Conseqüentemente, alarmes de vazamento são negligenciados e em alguns casos desligados (ZHANG, 2001).

Sistemas de detecção de vazamento são classificados em: estático, que são úteis após a detecção do vazamento, de modo a encontrar a sua localização, e em dinâmico, que podem ser utilizados enquanto a tubulação está operando. Esses métodos são capazes de detectar pequenos vazamentos e baseia-se no fato de que em uma linha sem fluxo uma queda de pressão indica vazamento (WIKE, 1986).

A seguir são apresentados alguns métodos de detecção e localização de vazamentos em tubulações encontrados no mundo:

Observação: a observação é a forma mais simples de detectar vazamentos, fazendo a inspeção visual regular da linha da tubulação.

Variações inesperadas: o vazamento é detectado na tubulação em operação por meio da variação de pressão e de fluxo. O vazamento pode provocar uma queda de pressão a montante e um aumento de fluxo também a montante. Este método pode ser aplicado apenas ao escoamento de fluidos incompressíveis em estado estacionário, caso contrário pode levar a alarmes falsos. Somente vazamentos maiores são detectados (WIKE, 1996).

Gradientes de pressão: baseia-se no princípio de que um vazamento deve distorcer o perfil de pressão ao longo de uma seção da tubulação. O gradiente médio de pressão ao longo da linha pode ser calculado por meio de medidores de pressão nas extremidades das seções. Um vazamento causa uma diminuição no gradiente médio, e através de técnicas de ajuste de curvas de interpolação entre medidas de pressão e o vazamento pode ser localizado com razoável precisão (WIKE, 1996).

Balanco de volume: é um dos métodos mais utilizados, sendo limitado pela exatidão da medida do volume e das variações associadas a ela. O método essencialmente mede o “volume que entra” e subtrai o “volume que sai”, a diferença significa vazamento. Falsos alarmes podem ocorrer porque a taxa de fluxo depende de parâmetros do fluido (temperatura, pressão, densidade e viscosidade), as variações nos parâmetros podem ser corrigidas por medições regulares das variáveis ao longo da tubulação ou preditas por um modelo de cálculo.

Assim, para evitar alarmes falsos, só será constatado o vazamento quando a diferença de fluxo exceder um valor limite, vazamentos de 2% de líquido e 10% de gases são necessários para a detecção. Vazamentos menores podem ser detectados com métodos não lineares adaptativos baseados na medida do fluxo e pressão na entrada e saída da tubulação. A localização não é possível por este método (SANDBERG et al, 1989; BLACK, 1992; WIKE, 1996).

Ondas de pressão negativa: no instante em que o vazamento ocorre há uma queda de pressão repentina no local originando uma onda de pressão negativa que se propaga à velocidade do som no sentido montante e jusante até que seja alcançado um novo estado estacionário.

Esta pressão negativa percorre longas distâncias apenas com atenuação moderada, providenciando uma detecção rápida para grandes tubulações. É preciso fazer uma filtragem cuidadosa dos dados porque as ondas de pressão negativas podem ser causadas por bombas, fechamento de válvulas e outros procedimentos normais da operação.

O sistema de detecção mostra um bom desempenho na detecção de pequenos vazamentos na ordem de 5% da taxa do fluxo do líquido nominal. A localização do vazamento é obtida com razoável precisão através da instalação de transientes de pressão nas extremidades das seções e ao longo da tubulação conhecendo-se as distâncias entre os mesmos, e da velocidade da onda de pressão quando ocorre o vazamento (BLACK, 1992; SILVA et al, 1996; WIKE, 1996).

Redes Neurais Artificiais: Belsito e outros (1998) desenvolveram um sistema de detecção e localização de vazamentos em tubulações transportando gás liquefeito baseado em redes neurais artificiais, que tem a capacidade de detectar e localizar vazamentos menores que 1% do valor nominal da vazão de fluxo a um custo aceitável.

Os dados para treinamento das redes foram adquiridos através da simulação do escoamento nas tubulações com e sem vazamento, levando em consideração os sinais de ruídos existentes nas tubulações e conseqüentemente gerando dados que constituiriam padrões de operação. No sistema em estudo foram detectados vazamentos muito menores que 1% da vazão do fluxo de entrada. O modelo numérico desenvolvido foi baseado em

equações de conservação de massa, movimento e energia, as quais foram resolvidas utilizando diferenças finitas.

Método estatístico: Zhang (2001) examina a aplicação do ATMOS PIPE desenvolvido pela Shell, para operar em tubulações de gás e líquido. Este método estatístico de detecção de vazamentos em tubulações não usa modelos matemáticos para calcular o fluxo e a pressão na tubulação, mas detecta as mudanças na relação entre o fluxo e a pressão usando dados de medidas disponíveis.

Ele calcula a probabilidade do vazamento, avisando o tamanho do vazamento e sua localização aproximada, baseada em medidas de fluxo e pressão. A taxa de alarmes falsos é muito baixa e as variações geradas por mudanças operacionais são registradas assegurando que o alarme de vazamento ocorra quando houver um padrão único de mudanças no fluxo e na pressão, suas características providenciam ao sistema uma capacidade de aprendizado *on-line* adaptando-se às mudanças na tubulação e nos instrumentos de medida.

O sistema foi testado em uma tubulação transportando etileno a alta pressão por 413 km. O sistema recolhe dados provenientes do SCADA existente, e após o processamento a posição da linha (normal ou vazamento) é devolvida ao SCADA juntamente com a taxa de vazamento e a estimativa do local. Durante as operações normais da tubulação o sistema não gerou alarmes falsos. Os testes de campo mostraram que o método pode detectar rapidamente os vazamentos e fornecer boas estimativas do seu tamanho e localização. Testes também foram feitos em tubulações transportando petróleo e propileno líquido.

Modelagem matemática: Embora existam diferentes formulações, a essência da maioria dos sistemas de modelagem é a mesma: solução de equações da conservação de massa, momento e energia. Estas equações não representam um sistema fechado e devem ser suplementadas por uma equação de estado e formulação do fator de fricção. Métodos numéricos são usados para resolver este grupo de equações não lineares, o resultado é uma ferramenta preditiva conhecida como modelo de tempo real, ou *on-line*. (BLACK, 1992).

O modelo estima variável intermediária ao longo da tubulação através de um conjunto limitado de medições reais da tubulação, como pressão a montante e fluxo a

jusante, que são usados como condições de contorno. As discrepâncias entre as variáveis intermediárias calculadas pelo modelo e medições reais são usadas para indicar vazamentos (WIKE, 1996).

Verde (2004) propôs um novo método de detecção e localização de vazamento em tubulações utilizando sensores de fluxo e pressão apenas no extremo final do duto. Assume um modelo simples não linear do fluido em tubulações com vazamentos, considerando uma condição de contorno desconhecida que depende da localização do vazamento, z_1 e $z_1 + z_2$ (parâmetros).

A detecção e a localização algoritma são feitas utilizando um esquema de múltiplas tarefas: (1) o monitoramento e a localização contínua da condição de vazamento, varrendo todas as posições possíveis de vazamento no duto, e (2) quando a condição de vazamento for detectada, o esquema liga e inicia a acomodação dos parâmetros desconhecidos (z_1 e z_2) no modelo, de modo que, um sinal do erro é minimizado satisfazendo confinamentos físicos. Os exemplos da simulação com um ou dois vazamentos são apresentados para mostrar a eficácia do procedimento de localização.

Fukushima e outros (2000) relata o sistema de detecção de vazamento de gás, em funcionamento desde 1997, instalado na tubulação Niigata – Sendai de 250 km de extensão. A detecção do vazamento é feita medindo-se pressão e temperatura nas estações de válvulas, distantes 12 km entre si, e medindo o fluxo de gás na entrada e na saída da tubulação. Como a demanda principal é para a estação de energia de Sendai, que opera continuamente, não há estado estacionário na operação da tubulação.

O sistema de detecção de vazamento automaticamente determina o local do vazamento e a taxa de vazamento em tempo real. Neste sistema o vazamento mínimo detectado é de 1,1%, e para localizar o vazamento é preciso que seja de no mínimo 1,8%. Com a carga máxima o vazamento é detectado em 8 minutos com erro de localização médio de 4%. Já com a carga mínima o vazamento é detectado em 4 minutos com erro de localização médio de 20%.

Métodos baseados em sensores: incluem métodos que detectam vazamentos através do sinal acústico detectado por terminais encontrados ao longo da tubulação, são exemplos:

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. (BLACK, 1992).

Sensores térmicos e eletroópticos: uma patrulha aérea dotada de sensor remoto pode detectar vazamentos de gás natural monitorando os gases metano e etano na atmosfera sob a tubulação. É projetado para detectar níveis baixos de metano e etano por meio de picos no espectro infravermelho. Um sistema similar usa imagens infravermelhas térmicas. (SANDBERG et al, 1989).

Sensores de ação seletiva: Sandberg e outros (1989) desenvolveram um sistema de sensor de hidrocarboneto que consiste em um módulo de alarme e um cabo sensor. O cabo sensor tem 2 km de comprimento e é instalado ao longo da tubulação.

O cabo é revestido de um polímero condutivo que incha ao entrar em contato com o hidrocarboneto que está vazando da tubulação. Ao inchar, o circuito existente dentro do cabo é fechado, acionando o alarme para avisar a presença de vazamento. O elemento chave do circuito de localização é a fonte de corrente constante e a alta impedância do voltímetro, que através da lei de Ohm permite a localização do vazamento.

Sensores ópticos: baseados em fibras ópticas, diferentes sensores ópticos são desenvolvidos para detectar vazamentos de líquidos, onde as fibras ópticas interagem diretamente ou indiretamente com o vazamento do líquido.

O sensor é constituído por uma fibra óptica e em paralelo um arame de reforço que são envolvidos por um polímero e este por sua vez é envolvido por um arame helicoidal. Quando ocorre o vazamento, o líquido ou o gás que são compatíveis com o polímero e com o sensor, são absorvidos pelo polímero e este aumenta o seu diâmetro e conseqüentemente comprime a fibra óptica contra o arame helicoidal.

Este fenômeno de comprimir a fibra aumenta a tensão óptica do sinal que viaja através da fibra permitindo a detecção e a precisão da localização do vazamento, pois o inchaço do polímero é guiado na direção preferencial para concentração da pressão osmótica em direção a fibra óptica. (CARRILO et al, 2001).

Mendoza e outros (2003) apresentaram a segunda parte do trabalho sobre sensores ópticos que consiste na preparação do polímero, ou seja, na modificação da densidade do polímero com o objetivo de aperfeiçoar o desempenho do sensor.

Quanto maior a densidade do polímero menor a sua capacidade de absorção e menor a força de pressão contra a fibra óptica, porque as cadeias dos polímeros estão muito fechadas entre elas e não permite uma grande absorção do solvente. Ao contrário, quando a densidade do polímero é baixa há uma grande capacidade de absorção, porém a pressão osmótica permanece a um nível muito baixo porque as cadeias poliméricas são raramente unidas produzindo uma pressão osmótica insuficiente para pressionar a fibra óptica. Consequentemente o polímero pode permanecer muito inchado de modo que ao invés de pressionar a fibra, diminui a pressão efetiva exercida contra ele.

Sensores acústicos: são métodos que podem detectar vazamentos muito pequenos em um curto espaço de tempo podendo ser aplicado em estruturas em operação, à temperatura ambiente ou elevada.

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 de um sistema satisfatório de amplificação e gravação dos dados. Técnicas de processamento de sinal também são requeridas para extrair as informações importantes dos dados coletados (MACLEOD et al, 1991).

Streicher (1991) apresentou conceitos de um sistema de monitoramento acústico de peças frouxas e de vazamentos com sua possível localização. O sistema permite um reconhecimento adiantado dos desvios de operação normal possibilitando uma rápida ação corretiva impedindo danos ambientais ou danos em equipamentos.

Observou-se que o ruído de operação e o ruído gerado por vazamento foram independentes, ou seja, numa operação normal o ruído de fundo é conhecido e qualquer alteração de sinal de amplitude que venha apresentar este ruído significa existência de vazamento. A localização do vazamento é determinada por comparação entre amplitudes

dos ruídos gerados em diferentes pontos ao longo da estrutura. Estes ruídos são captados por microfones piezoelétricos presos contra a estrutura.

Foi possível a detecção e localização de vazamentos menores do que 5 litros/h, quando o ambiente externo estava relativamente silencioso, e a magnitude do vazamento foram estimados com uma precisão de $\pm 40\%$ através da relação entre amplitude do ruído gerado e taxa de vazamento.

Shimanskiy e outros (2003) desenvolveram um método de detecção de pequenos vazamentos baseado em microfones resistentes a altas temperaturas e com capacidade de detectar taxas de fluxos de $1\text{m}^3/\text{h}$ a $500\text{m}^3/\text{h}$.

Estes microfones foram instalados em um avançado reator térmico na usina nuclear de Fugen, no Japão. Para a detecção foi estabelecida uma relação entre 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. Para a localização do vazamento foi utilizada a técnica de aproximação por multi-canal que consiste na utilização dos valores de correção cruzada medidos em diferentes posições por diferentes pares de microfones.

Muggleton e outros (2004) apresentaram estudos sobre a detecção de vazamentos de água, em uma tubulação enterrada no solo, utilizando o método acústico. Foi determinada a localização de vazamentos em tubulações plásticas, bem como o que acontece com o som provocado pelo vazamento quando a tubulação está submersa em uma extensão de água, tal como atravessar um rio ou um lago.

A energia acústica gerada por um vazamento de água em uma tubulação submersa propaga frequências relativamente baixas geralmente menores do que 200 Hz. Concluiu-se que a atenuação do sinal de onda gerado pelo vazamento na tubulação enterrada no solo foi relativamente aumentada comparada com aquela observada em uma tubulação imersa em água.

2.2 – Detecção de vazamentos por computador *on-line*

Desde 1989 desenvolve-se no Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos (DESQ) / FEQ / UNICAMP estudos sobre as técnicas de detecção e localização de vazamentos em tubulações por métodos computacionais *on-line*.

Naves (1991) desenvolveu uma técnica para detecção de vazamentos baseado na detecção e análise de transientes de perda de carga na tubulação. Estudou também as características de transientes hidráulicos gerados pela ocorrência de vazamentos em tubulações através de simulação, utilizando-se equações da continuidade e da quantidade de movimento, resolvidas pelo método das características.

Perfis experimentais de transientes de pressão foram obtidos em uma tubulação de PVC de 20 metros de comprimento e ¾” de diâmetro. O sistema de aquisição de dados em tempo real era composto por dois transdutores de pressão (do tipo célula capacitiva), sendo um na entrada e outro na saída da tubulação, conectados a um microcomputador PC através de um circuito condicionador e amplificador de sinal e uma placa Analógica-Digital/Digital-Analógica de 12 bits.

Os resultados experimentais foram obtidos sob várias condições de parâmetros que afetam diretamente o vazamento: magnitude de vazamento (10, 20, 30, 40 e 50% da vazão nominal do fluxo), número de Reynolds (6000, 8000, 10000 e 12000) e a posição do vazamento (5, 10 e 15 metros da entrada da tubulação).

Na Figura 2.1 são mostrados os perfis da perda de carga na tubulação obtidos através da simulação e da aquisição de dados *on-line*. A simulação foi baseada em uma tubulação reta de 20 m de comprimento e condições de contorno foram necessárias nas extremidades, onde não existem equações para relacionar as variáveis do processo, adotando reservatório a montante e válvula a jusante; enquanto que os dados experimentais foram obtidos de uma tubulação que apresentava curvas e as medidas foram feitas por transdutores localizados nas extremidades, o que levou as diferenças nos perfis de pressão.

Os resultados mostraram o aumento da variação da perda de carga com o aumento da vazão do líquido e do vazamento, esta variação depende da posição do vazamento na

tubulação. Vazamentos da ordem de 0,5% da vazão nominal do escoamento foram detectados, mas a sua localização não foi possível. O tempo de detecção constituiu basicamente do tempo de resposta do transdutor, não havendo diferenciação nítida entre os diversos tempos de detecção do transiente de perda de carga para as diferentes posições de vazamento.

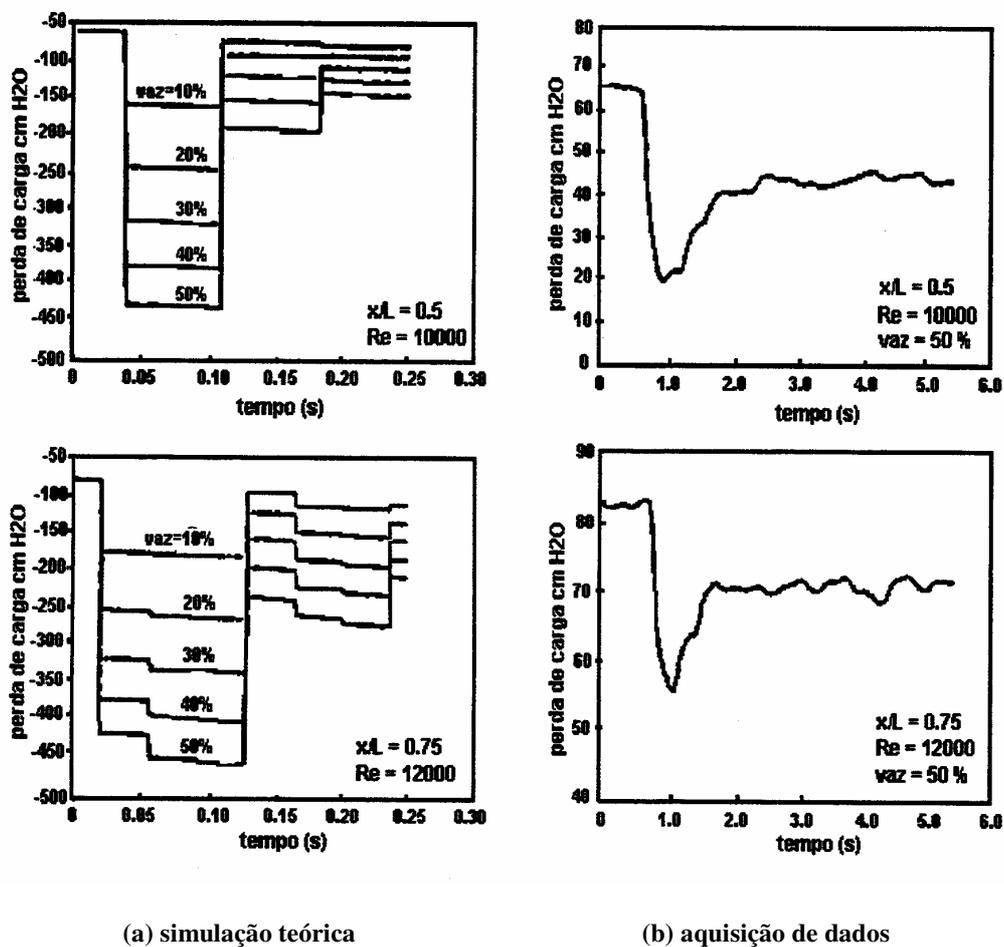


Figura 2.1: Perfis dos gradientes de pressão obtidos por Naves (1991).

Buiatti (1995) desenvolveu um método computacional de análise de transientes hidráulicos em uma tubulação de 427 m de comprimento, 3/4" de diâmetro, com o objetivo de detectar e localizar vazamentos.

Ao longo da tubulação foram fixados 4 transdutores de pressão (do tipo piezoelétrico) a 6,5 m, 165,1 m, 262,3 m e 420,9 m da entrada da tubulação, e 3 conjuntos de válvulas solenóide-gaveta, a 85,7 m, 170,9 m e 256,2 m, para controlar a magnitude do vazamento. Os transdutores e as válvulas foram conectados a um microcomputador equipado com placa conversora ADA.

Experimentos foram realizados sob regime de escoamento turbulento, com o número de Reynolds variando de 5000 a 13000, e magnitudes de vazamento de até 50% da vazão nominal de líquido na tubulação.

A Figura 2.2 apresenta o perfil de pressão observado para um vazamento da ordem de 0,5 % da vazão nominal de líquido na tubulação e número de Reynolds de 9000.

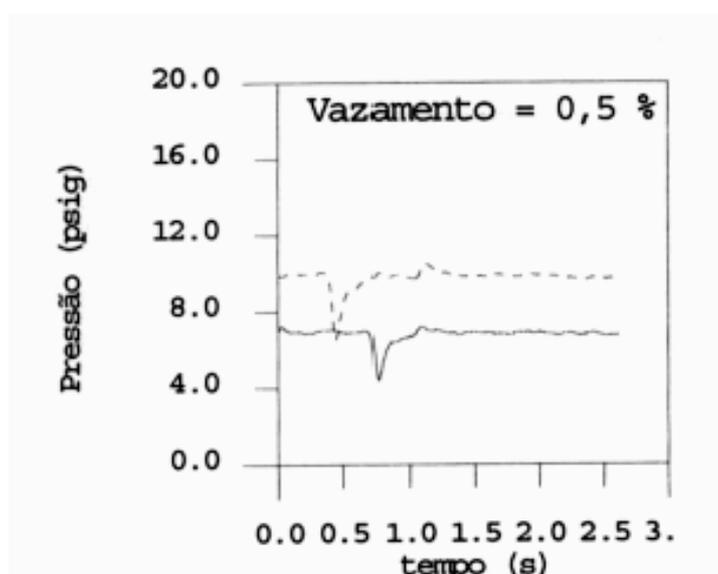


Figura 2.2. Vazamento entre T1 e T2. Re 9000 (BUIATTI, 1995).

Buiatti (1995) determinou também a velocidade de propagação da onda de pressão. Os resultados mostraram que a velocidade diminui com o aumento da vazão de líquido e da distância entre o vazamento e os transdutores. Os valores determinados para a velocidade da onda ficaram na faixa entre 470 e 530 m/s.

A Figura 2.3 mostra como a velocidade pode ser calculada experimentalmente a partir dos perfis de transientes de pressão obtida por dois transdutores quaisquer.

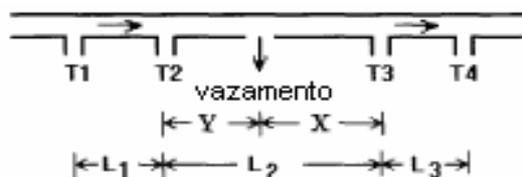


Figura 2.3. Esquema de uma tubulação com vazamento entre os transdutores 2 e 3.

A equação para localização da posição do vazamento foi desenvolvida por Buiatti (1995), onde a localização é expressa em termos da distância Y entre o vazamento e o transdutor mais próximo:

$$Y = \frac{[L_2 + v(t_2 - t_3)]}{2} \quad (2.1)$$

$$v = \frac{L_1}{(t_1 - t_2)} \quad \text{ou} \quad v = \frac{L_3}{(t_4 - t_3)} \quad (2.2)$$

onde L_2 é a distância entre os transdutores 2 e 3; t_2 e t_3 os tempos de detecção dos transdutores T2 e T3 e v a velocidade de propagação da onda de pressão.

O método provou ser eficaz na detecção de vazamentos da ordem de até 0,5 % da vazão de escoamento líquido e que foi possível localizar vazamentos apresentando erro médio de localização, sendo que quanto menor à distância entre os transdutores e o local do vazamento, menor o erro de localização.

Silva (1996) estendeu o trabalho para escoamento em regime laminar, com o Número de Reynolds variando de 1000 a 12000, em uma tubulação de PVC de 1248 m de extensão e 3/4" de diâmetro. A aquisição de dados foi feita por um microcomputador com placa ADA ligada a 4 transdutores de pressão fixados a 494, 744, 994 e 1244 metros da entrada da tubulação e os vazamentos foram provocados através da abertura de válvulas solenóide-gaveta a 250 e 750 metros da entrada da tubulação.

Os valores medidos da velocidade da onda ficaram na faixa de 470 a 485 m/s e os vazamentos da ordem de 9% foram facilmente detectados. A Tabela 2.1 mostra a precisão da localização do vazamento para cada número de Reynolds.

Tabela 2.1 – Precisão na localização de vazamentos (SILVA, 1996).

| Número de Reynolds | Distancia ao transdutor mais perto ± erro (m) | Distancia ao transdutor mais perto ± erro (m) |
|---------------------------|--|--|
| 1000 | 243 ± 2,0 | 742 ± 4,0 |
| 2000 | 243 ± 5,0 | 742 ± 5,0 |
| 5000 | 243 ± 8,0 | 742 ± 8,0 |
| 7000 | 243 ± 3,0 | 742 ± 4,0 |
| 8000 | 243 ± 3,0 | 742 ± 5,0 |
| 12000 | 243 ± 1,0 | 742 ± 5,0 |

Cariatti (1999) utilizou as mesmas configurações da tubulação utilizada por Silva (1996) para testar a técnica de detecção de vazamentos para casos em que o fluido era líquido (água) e misturas gás-líquido (ar-água). As condições de operação estudadas foram: número de Reynolds (líquido) entre 2000 a 12000, porcentagem de vazamento entre 2 a 50% da vazão nominal de líquido e vazão de ar entre 1,7 a 9,6 litros/min.

Para tubulações transportando líquido, a técnica detecta vazamentos da ordem de 10% em escoamento laminar e 2% em escoamento turbulento. Os valores calculados da velocidade da onda de pressão ficaram na faixa entre 490 e 540 m/s, mostrando-se praticamente independente do número de Reynolds e da magnitude e posição do vazamento.

A Figura 2.4 mostra a influência do número de Reynolds e da magnitude do vazamento sobre a velocidade da onda de pressão.

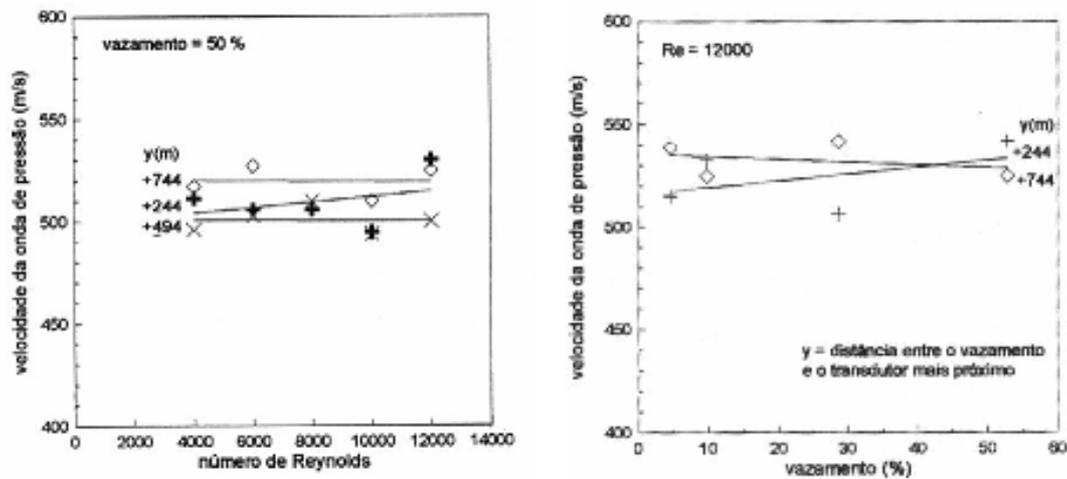


Figura 2.4. Influência do número de Reynolds e magnitude do vazamento na onda (CARIATTI, 1999).

Para o caso da tubulação transportando mistura gás-líquido foram realizados diferentes tipos de experimentos como mostram a Figura 2.5, a saber:

(a) Injeção de uma bolha de ar, sem ocorrência de vazamento: a presença da bolha não alterou o valor da pressão ao longo da tubulação e do mesmo modo, não houve alteração nos perfis de pressão. Os pulsos de pressão observados na Figura 2.5(a) correspondem ao transiente hidráulico gerado pela injeção da bolha na tubulação.

(b) Injeção de múltiplas bolhas, sem ocorrência de vazamento: os pulsos indicam a passagem das ondas de pressão pelos transdutores, mas com passar do tempo o sistema tende a entrar novamente em regime permanente e o novo estado de equilíbrio é caracterizado por uma pressão maior do que aquela no estado inicial.

(c) Injeção de uma bolha de ar, com ocorrência de vazamento: o vazamento foi provocado somente quando a distância estimada da bolha era de 600 m da entrada da tubulação e os resultados mostram que a pressão sofre uma brusca redução, mas seu valor não se recupera totalmente.

(d) Escoamento contínuo de uma mistura ar-água, com ocorrência de vazamento: a ocorrência de vazamento foi detectada somente pelos transdutores mais próximos do vazamento e para vazamentos maiores de 30% da vazão nominal de líquido. A presença do gás na tubulação amortece o efeito da onda de pressão, pois a sua velocidade

variou entre 43 e 76 m/s sendo que estes valores são 9 vezes menores do que aqueles medidos em uma tubulação transportando líquido.

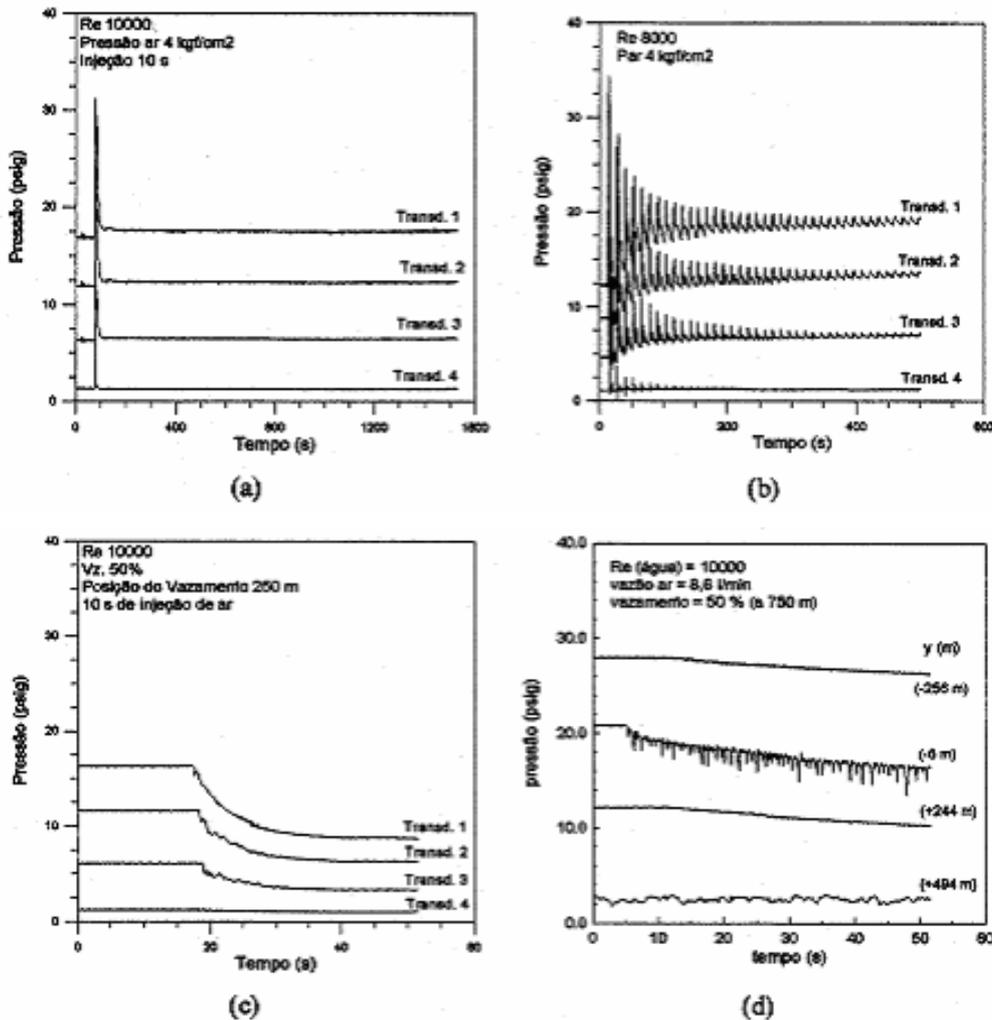


Figura 2.5. Perfis de pressão obtidos por Cariatti (1991).

De um modo geral, os resultados mostram que o gás escoando na tubulação absorve grande parte do impacto causado pela onda de pressão, quando da ocorrência de vazamento, e também que existe maior dificuldade de propagação da onda de pressão no sentido contrário ao fluxo da tubulação.

Braga (2001) aprofundou o estudo realizado por Cariatti (1999), detectando transientes de pressão causados por vazamentos na tubulação de 1248 m de comprimento operando com um sistema ar-água.

O estudo foi realizado para diferentes condições de operação: número de Reynolds do líquido entre 4000 e 10000; porcentagem de vazamento de 10 a 50%; vazão de ar de 2,5 e 58 l/min; tempos de injeção das bolhas de 10 a 20 s; posição de vazamento a 250 m e 750 m da entrada da tubulação.

O trabalho experimental constituiu-se na detecção e análise de transientes de pressão gerados para os seguintes casos:

(a) Injeção de bolhas isoladas de ar, sem vazamento: a entrada da bolha de ar provoca uma onda de choque que se propaga ao longo da tubulação e após a sua passagem a pressão ao longo da tubulação retorna ao valor inicial.

(b) Para a detecção de vazamentos na presença de uma única bolha de ar: os transientes de pressão apresentam uma queda da pressão seguida de uma recuperação parcial em relação ao seu valor original. Para número de Reynolds e vazão de ar constante, o aumento na magnitude do vazamento aumenta a queda no valor da pressão e diminui sua recuperação. A detecção é afetada pela distância entre o vazamento e o transdutor e a quantidade de ar, que provoca um amortecimento na onda de pressão. A presença de ar gera reflexões da onda (efeito elástico) que interferem na detecção.

(c) Detecção de vazamento durante escoamento contínuo ar-água: os transientes apresentam apenas pequenas variações na pressão devido à presença de ar fluindo continuamente na tubulação provocar grande amortecimento da onda de choque gerada pelo vazamento. A detecção do vazamento foi possível apenas para o transdutor localizado a 750 m da entrada da tubulação, $Re > 6000$ e razão de vazamento maior que 30% da vazão nominal do líquido.

Souza (2002) desenvolveu uma técnica de detecção de vazamentos em tubulações baseada na análise espectral de sinais de pressão medidos em trechos da tubulação (zona de reflexão) que favorecem a formação de ondas estacionárias. Este método possibilita a detecção de vazamentos mesmo quando este ocorre durante a realização de operações como

partidas e paradas de bombas ou interrupção do fluxo. Estas operações geram transientes que podem encobrir o transiente de pressão gerado pelo vazamento.

Testes experimentais foram realizados na tubulação de 1248 m de extensão sob diversas condições de fluxo e de vazamento durante a partida e a parada de uma bomba centrífuga.

Verificou-se que através da medida da fração energética em torno dos harmônicos associados ao trecho de reflexão é possível detectar a presença de vazamentos na tubulação com uma porcentagem de acerto superior a 70%.

Macias (2004) desenvolveu uma técnica de detecção de vazamentos em tubulações transportando gás, baseada na análise em tempo real de transientes de pressão, para os casos em que a tubulação operava com e sem alimentação contínua de gás (ar comprimido).

O trabalho experimental foi realizado em uma tubulação de ferro galvanizado de ½” de diâmetro, com 6 m de comprimento para os experimentos sem alimentação contínua de ar, e 60 m de comprimento para os experimentos com alimentação contínua de ar.

Foram instalados na tubulação dois transdutores de pressão (na entrada e na saída) acoplados a um computador PC através de uma placa ADA. Vazamentos foram simulados a partir de uma saída lateral onde foi posicionado um orifício, com diâmetro variando de 0,7 a 5 mm. A pressão de operação da tubulação variou numa faixa de 1 a 6 kgf/cm².

Os resultados experimentais mostraram que foi possível detectar vazamentos maiores do que 10% do fluxo nominal na tubulação com escoamento. A ocorrência de vazamento provocou uma queda, seguida de estabilização, no valor da pressão, comportamento diferente daquele observado na tubulação transportando líquidos, onde a ocorrência de vazamento gera um pulso de pressão, isto é uma queda seguida de uma recuperação parcial da pressão.

O trabalho experimental constituiu-se na detecção e análise de transientes de pressão gerados para os seguintes casos:

(a) Detecção de vazamento em trecho fechado da tubulação: a pressão caiu continuamente e quanto maior o orifício através do qual ocorreu o vazamento, mais rápido foi a queda de pressão (Figura 2.6).

Nos casos onde o vazamento foi interrompido pelo fechamento da válvula, observou-se em todos os transientes de pressão uma queda de pressão seguida de uma pequena recuperação no instante do fechamento. A tubulação de 6 m de comprimento apresentou uma queda mais abrupta na pressão, simplesmente porque o volume é menor, enquanto a tubulação de 60 m apresentou efeitos causados pela propagação de onda de pressão em um trecho não linear da tubulação (Figura 2.7).

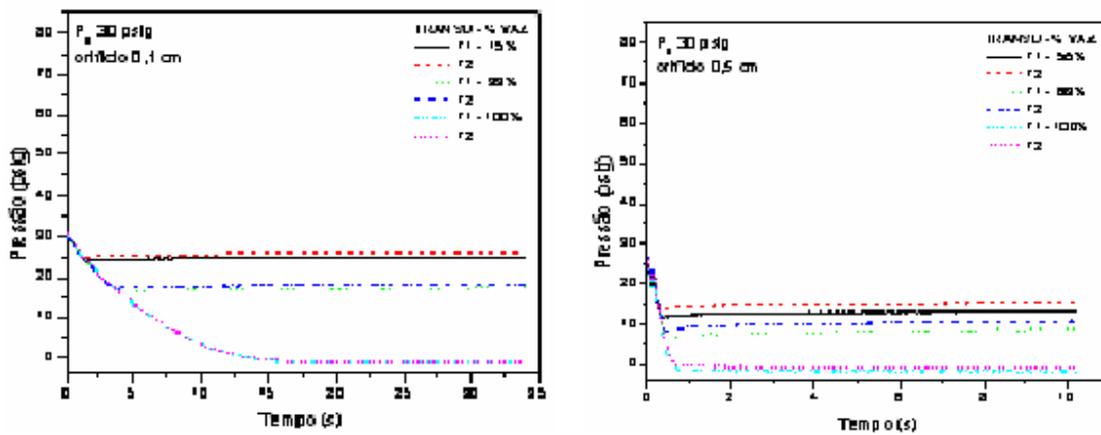


Figura 2.6. Transientes de pressão em tubulação isolada para orifícios de 1 a 5 mm (MACIAS, 2004).

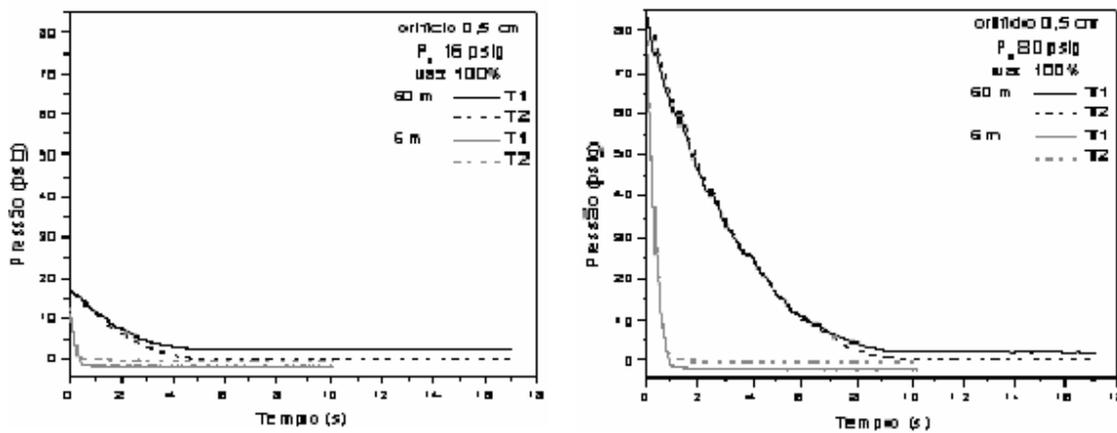


Figura 2.7. Comparação entre transientes de pressão, tubulação 6 e 60m, orifício 5mm (MACIAS, 2004).

(b) Detecção do vazamento em tubulação com escoamento contínuo: os experimentos foram realizados para orifícios de 1 mm, 2 mm e 5 mm para diferentes pressões e observou-se que para o orifício de 1mm não foi possível detectar o vazamento. Para os orifícios de 2 e 5 mm foi possível detectar o vazamento, para a faixa de pressão estudada (Figura 2.8). A pressão na tubulação só recuperou rapidamente seu valor inicial apenas quando a válvula de vazamento era fechada logo após a sua abertura (Figura 2.9).

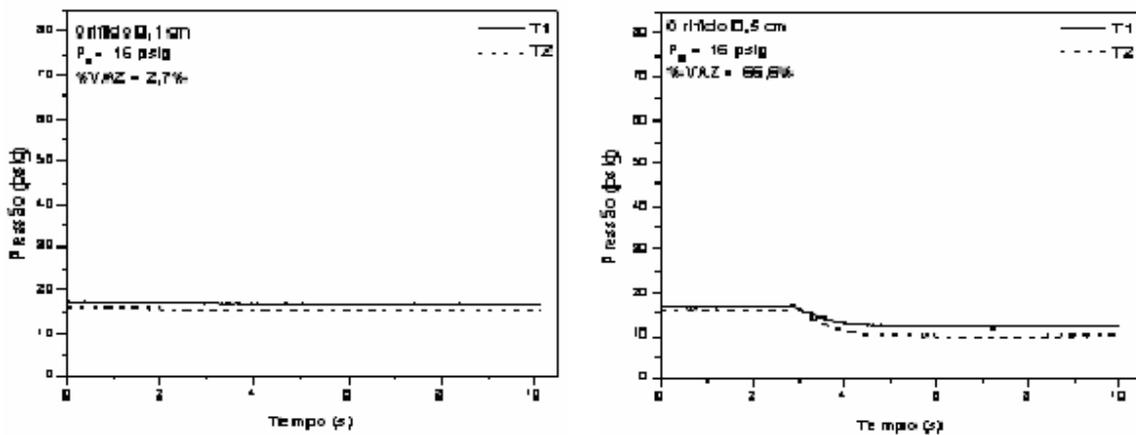


Figura 2.8. Transientes de pressão em tubulação com escoamento (MACIAS, 2004).

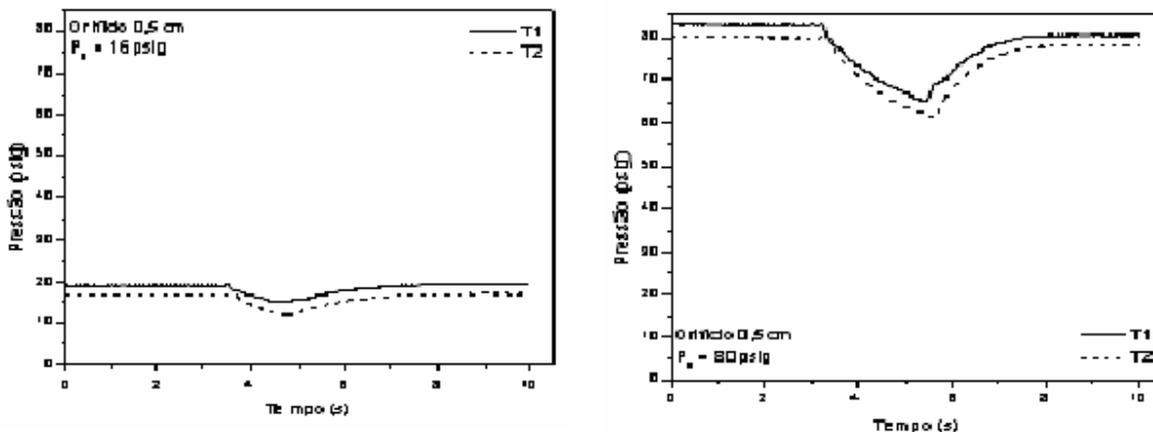


Figura 2.9. Transientes de pressão em tubulação com escoamento; vazamento de 1 s (MACIAS, 2004).

Recentemente Pavan (2005) estendeu o estudo de técnicas de detecção de vazamentos para os vasos de pressão, com o desenvolvimento de uma técnica baseada na análise em tempo real do ruído sonoro gerado pelo vazamento.

Na montagem experimental foi utilizado um vaso de pressão com capacidade de 34,5 litros operando com ar comprimido. A pressão utilizada no interior do vaso variou de 1 a 7 kgf/cm² e vazamentos de diversas magnitudes foram simulados através de um orifício instalado lateralmente no vaso de pressão, cujo diâmetro variou de 0,1 a 4 mm.

O programa para a detecção do vazamento foi desenvolvido em linguagem C que fez a aquisição *on-line* através de uma placa ADA dos sinais provenientes de um transdutor de pressão e de um microfone instalado no interior do vaso. O microfone foi desenvolvido no laboratório e o sistema de detecção incluiu um circuito eletrônico para compatibilizar o sinal proveniente do microfone com aquele compreendido pela placa ADA, apresentando duas etapas: na primeira o sinal é amplificado e na segunda o sinal passa por banco de filtros passa-faixa gerando três sinais contínuos em diferentes faixas de frequências de 1 kHz, 5 kHz e 9 kHz.

Foram detectados vazamentos de gás no vaso de pressão para as seguintes situações:

(a) Detecção de vazamento para o vaso sem alimentação contínua de ar: o tempo de cada experimento foi suficiente para que o sistema readquirisse o estado estacionário através do esvaziamento total do vaso. A queda de pressão aumentou com o diâmetro do orifício utilizado e provocou também uma alteração na frequência dominante do sistema. No instante em que o vazamento foi provocado, um ruído sonoro foi gerado e este por sua vez era constituído por três frequências com diferentes amplitudes. O ganho foi mantido fixo em 1 para as experiências realizadas e foi observado um aumento das amplitudes em função do aumento do orifício como apresentado nas Figuras 2.10 e 2.11.

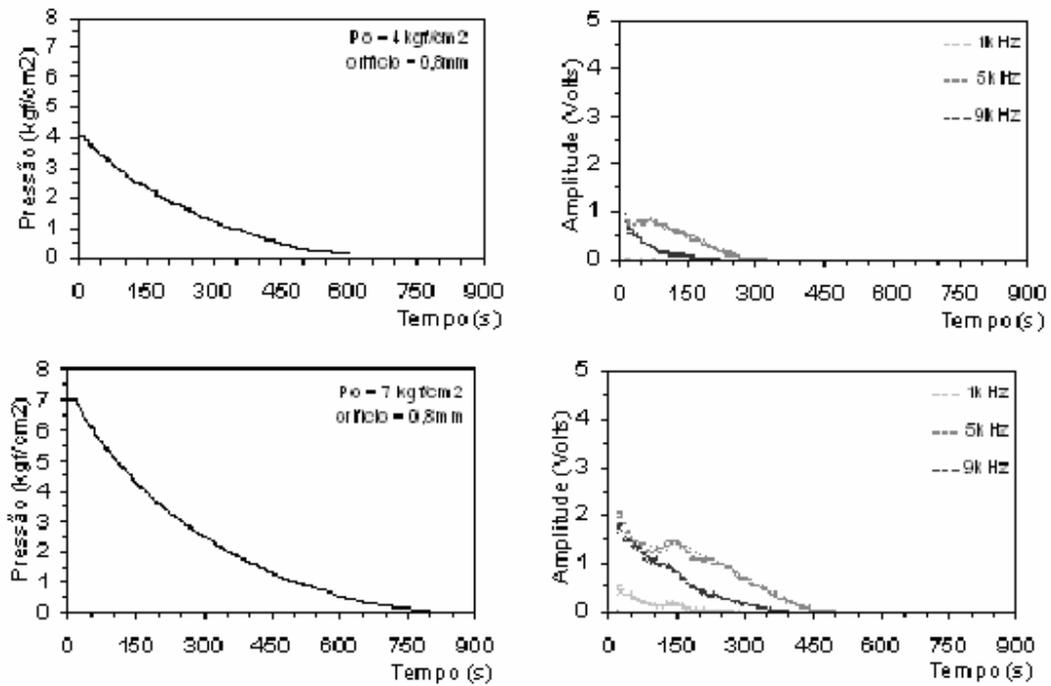


Figura 2.10. Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro, orifício 0,8mm (PAVAN, 2005).

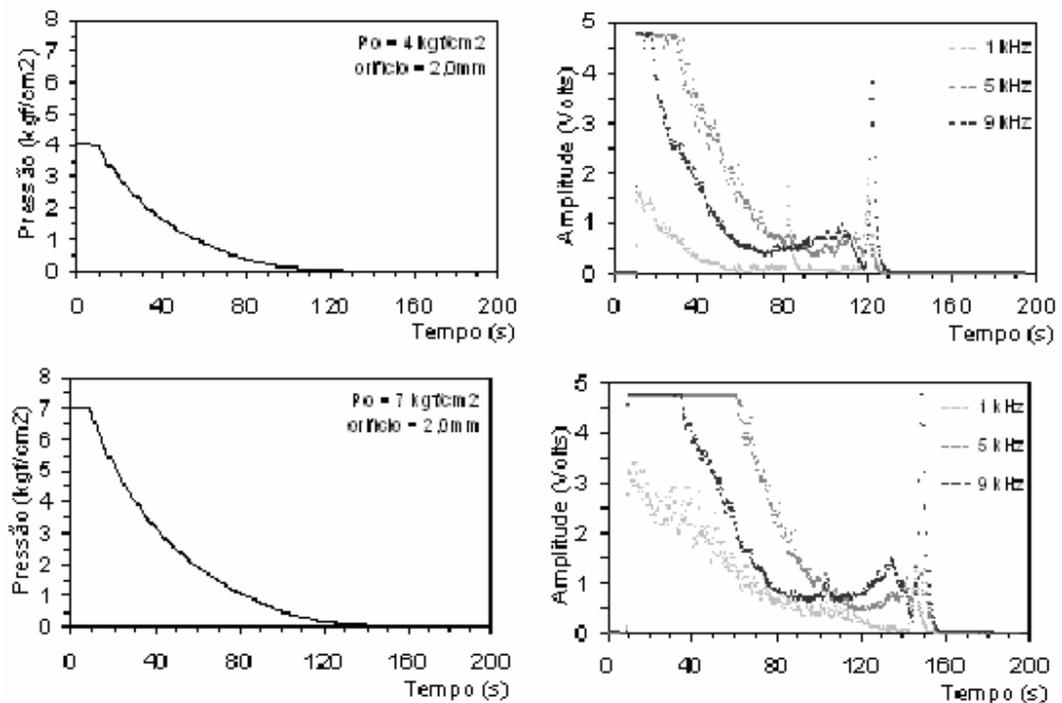


Figura 2.11. Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro, orifício 2,0 mm (PAVAN, 2005).

(b) Detecção de vazamento para o vaso com alimentação contínua de ar: Quando o vazamento foi provocado observou-se que a pressão interna do vaso sofreu uma pequena redução e permaneceu constante, enquanto que a amplitude do ruído sonoro aumentou bruscamente (Figuras 2.12 e 2.13).

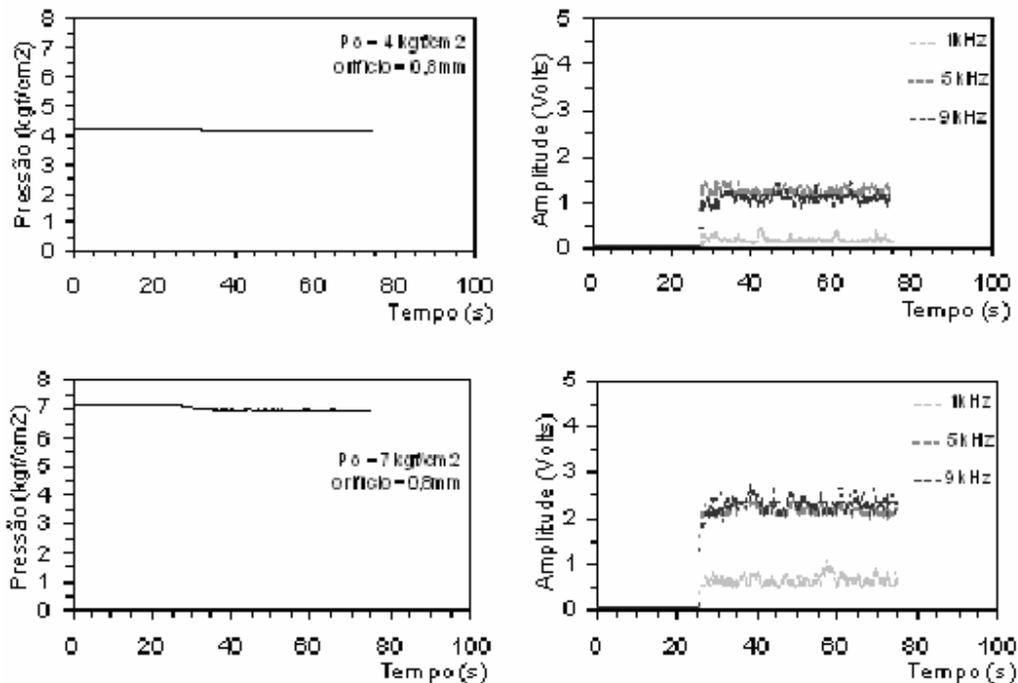


Figura 2.12. Transientes de pressão e amplitudes do ruído sonoro, orifício 0,8 mm (PAVAN, 2005).

Da mesma forma que para o vaso sem alimentação contínua, o aumento do orifício provocou também uma alteração na frequência dominante do sistema, ou seja, para orifícios menores a frequência dominante foi de 9kHz e apresentou som agudo e para orifícios maiores a frequência dominante foi de 1kHz e apresentou som mais grave.

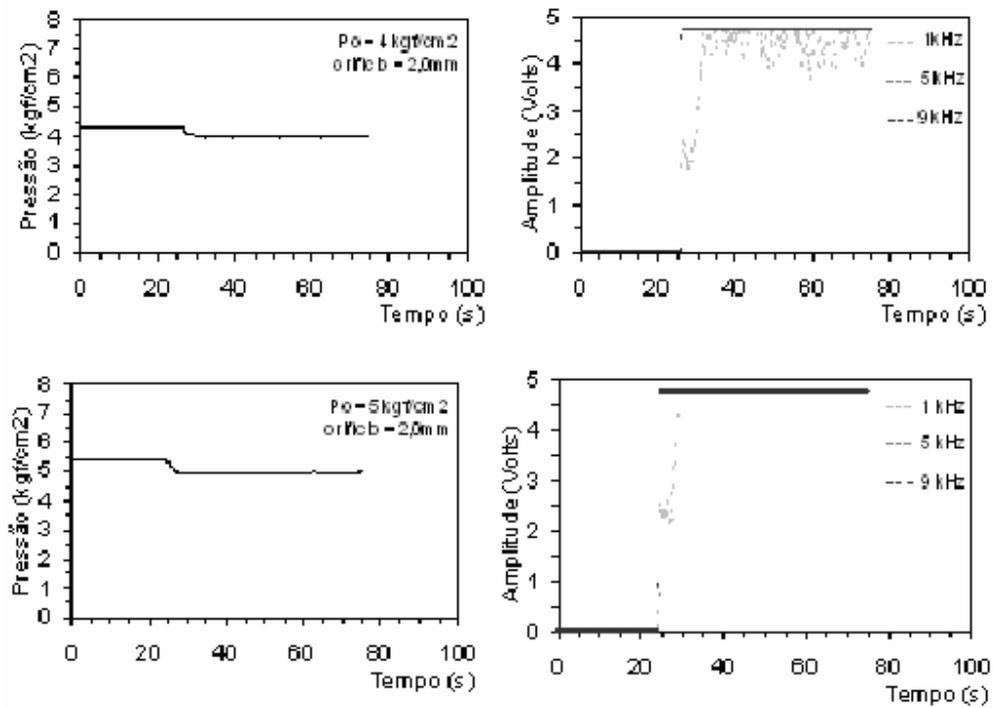


Figura 2.13. Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro, orifício 2,0 mm (PAVAN, 2005).

Com estes resultados foi possível detectar vazamentos em vasos de pressão através do ruído sonoro gerado pelo vazamento. O método mostrou-se eficiente na detecção de vazamentos de menor grandeza, mesmo quando a variação na pressão interna do vaso não era significante.

Tabela 2.2 – Estudos sobre técnicas de detecção e localização de vazamentos por métodos computacionais on-line realizados no DESQ.

| ALUNOS | ANO | OBJETIVO DO TRABALHO |
|---------------|------------|---|
| Naves | 1991 | Detecção de vazamentos em tubulação de PVC com 20 m de comprimento e 3/4” de diâmetro transportando líquido baseado na análise de transientes de perda de carga |
| Buiatti | 1995 | Detecção e localização de vazamentos em tubulação de PVC com 427 m de comprimento e 3/4” de diâmetro transportando líquido baseado na análise de transientes hidráulicos |
| Silva | 1996 | Detecção de vazamentos em tubulação de PVC com 1248 m de comprimento e 3/4” de diâmetro transportando líquido baseado na análise de transientes hidráulicos |
| Cariatti | 1999 | Detecção de vazamentos em tubulação de PVC com 1248 m de comprimento e 3/4” de diâmetro transportando líquido e gás-líquido baseado na análise de transientes hidráulicos |
| Braga | 2001 | Detecção de vazamentos em tubulação de PVC com 1248 m de comprimento e 3/4” de diâmetro transportando gás líquido baseado na análise de transientes hidráulicos para várias condições de operação |
| Souza | 2002 | Detecção de vazamentos em tubulação de PVC com 1248 m de comprimento e 3/4” de diâmetro transportando gás-líquido baseada na análise espectral de sinais de pressão medidos em trechos da tubulação |
| Macias | 2004 | Detecção de vazamentos em tubulação de ferro galvanizado com 6 e 60 m de comprimento de 1/2” de diâmetro transportando gás baseada na análise de transientes de pressão simulados e reais para várias condições de operação |
| Pavan | 2005 | Detecção de vazamentos em vaso de pressão com capacidade de 34,5 L baseada no método acústico e na análise do transiente de pressão para várias condições de operação |

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, as características do transiente de pressão e do ruído sonoro gerados pela ocorrência de vazamento de gás em uma tubulação de ½” polegada de diâmetro e 60 metros de comprimento, ligada a um vaso de pressão, foram analisadas para diversas condições de operação, quando a tubulação operava sem e com alimentação contínua de gás.

O gás utilizado nos experimentos foi o ar comprimido proveniente da linha que serve os laboratórios da FEQ. A pressão do ar foi controlada através de um manômetro instalado na entrada da tubulação. A pressão máxima utilizada na linha foi de 7 kgf/cm².

O vazamento foi provocado manualmente através de uma válvula de abertura/ fechamento rápido instalada em uma saída lateral na entrada da tubulação. A magnitude do vazamento foi controlada pela instalação de orifícios de diâmetros variáveis em uma seção da saída lateral, anterior à válvula. Os diâmetros dos orifícios utilizados estiveram na faixa entre 0,8 e 5,0 mm.

O monitoramento foi feito através de um microfone e de um transdutor de pressão instalados primeiramente no vaso de pressão e posteriormente à entrada da tubulação, ambos conectados a um microcomputador através de uma placa ADA (Analógica – Digital – Analógica).

Os vazamentos foram simulados experimentalmente para várias condições de operação e para duas situações:

- Com o microfone e transdutor de pressão localizado no vaso de pressão como mostra o esquema da montagem experimental na Figura 3.1.

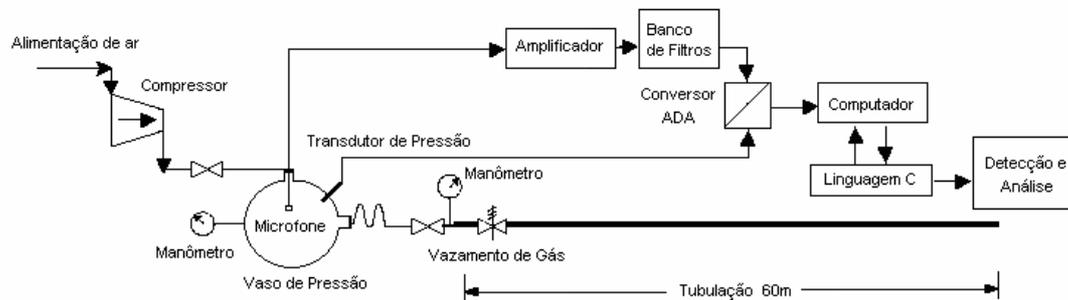


Figura 3.1 – Esquema da tubulação com transdutor e microfone localizados no vaso de pressão.

- Com o microfone e transdutor de pressão instalados na extremidade à entrada da tubulação, como mostra o esquema da montagem experimental na Figura 3.2.

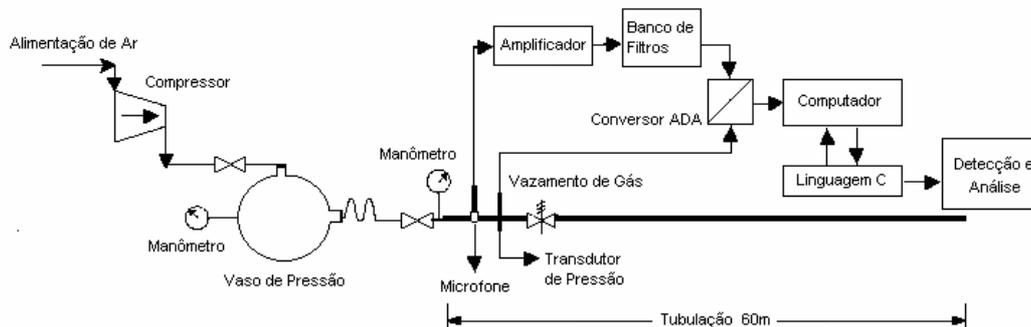


Figura 3.2 – Esquema da tubulação com transdutor e microfone localizados no início da tubulação.

3.1 - Montagem do Protótipo

O sistema utilizado para a realização dos ensaios de detecção de vazamento de gás em uma tubulação está apresentado na Figura 4.1, onde se observa: (a) o vaso de pressão com capacidade de armazenar 34,5 litros de ar comprimido a uma pressão de até 19kgf/cm², (b) tubulação de ferro galvanizado de 60 m de comprimento, (c) computador.



Figura 3.1 - Foto ilustrativa do sistema de detecção de vazamento.

3.2 – Especificação dos equipamentos

Vaso de Pressão: constituiu-se de um botijão de gás com capacidade para armazenar 34,5 litros de ar comprimido a uma pressão de até 19 kgf/cm².

Tubulação: foi utilizada uma tubulação de ½” de diâmetro e 60 m de comprimento, construída a partir de 10 tubos de ferro galvanizado de 6 m de comprimento cada e unidos com 18 cotovelos de 90°. Cada cotovelo possui um comprimento equivalente a 0,474 m. Assim os 18 cotovelos correspondem a 8,5 m de comprimento.

Transdutor de pressão: é um aparelho que tem a capacidade de transformar uma quantidade física (pressão) em voltagem ou corrente elétrica equivalente. O transdutor de pressão utilizado neste trabalho é do tipo piezoelétrico, constituído de um material sólido que tem a capacidade de gerar uma carga elétrica proporcional à deformação sofrida, produzindo uma diferença de potencial entre os eletrodos.

O transdutor utilizado é da marca COLE PARMER modelo K1, calibrado para realizar leituras de até 300 psig (20 kgf/cm²), com precisão de $\pm 0,4$ psig, para um sinal elétrico variando entre 0 e 5 V.

Microfone: é um dispositivo eletromecânico utilizado para converter o som em energia elétrica. O microfone foi desenvolvido em laboratório (PAVAN 2005) e é do tipo CZN-15E omnidirecional. Este tipo de microfone apresenta pouquíssima distinção quanto à direção em que o som incide, respondendo igualmente aos sons vindos de todas as direções.

Pré-Amplificador do Microfone: utilizado para converter a alta impedância do sinal do microfone a um valor adequadamente baixo para que pudesse ser transmitido à longa distância através de um cabo, sem perda significativa.

Banco de Filtros Passa Faixa: necessário para compatibilizar novamente o sinal gerado pelo microfone com aquele compreendido pela placa de aquisição A/D.

Placa conversora Analógico/Digital/Analógico: a placa utilizada neste experimento é a placa ADA de 12 bits, versão 2.2 da TAURUS ELETRÔNICA – Brasil.

Microcomputador: O microcomputador utilizado na montagem experimental foi um Pentium 233 MHz, Disco Rígido de 500MB e 16 MB RAM.

3.3 – Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados constituiu-se de um sensor (microfone), transdutor, condicionador de sinal, placa conversora Analógico/Digital/Analógico, microcomputador e programa de aquisição de dados. O sistema de aquisição de dados tem como função o monitoramento em tempo real dos dados fornecidos pelo microfone e pelo transdutor de pressão.

3.3.1 – Sensores e Transdutores

Os sensores e transdutores são elementos que captam variações físicas e convertem-nas em sinais e impulsos elétricos. No experimento foi utilizado um transdutor de pressão para medir a variação de pressão e um microfone para captar o ruído sonoro gerado pelo vazamento. O transdutor e o microfone foram conectados ao microcomputador, através da placa ADA.

O transdutor de pressão utilizado neste trabalho é do tipo piezoelétrico e o microfone utilizado é do tipo CZN-15E omnidirecional. Para que o sinal elétrico emitido pelo microfone seja compreendido pela placa de aquisição Analógico/Digital é necessário passá-lo primeiramente por um pré-amplificador de sinal e em seguida por um banco de filtros passa-faixa que transforma o sinal proveniente do pré-amplificador em três sinais com amplitudes independentes, cada uma com uma faixa de frequência específica. As frequências utilizadas foram de 1 kHz, 5 kHz e 9 kHz, por apresentarem melhor resposta ao sinal gerado.

3.3.2 – 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. O condicionador de sinais utilizado neste trabalho foi constituído 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 Analógico/Digital.

3.3.3 – Placa Conversora ADA

A placa conversora Analógico/Digital/Analógico (ADA) é composta de um multiplexador, um conversor Analógico/Digital (CAD) de 12 bits e 8 canais, e um conversor Digital/Analógico (CDA) de 10 bits e 8 canais e a placa digital – digital de 8 bits, com 8 canais de entrada e 8 canais de saída.

Como estes conversores enviam sinais ao microcomputador simultaneamente e estes sinais são de natureza analógica, foi necessário utilizar um multiplexador e um conversor Analógico/Digital (CAD) em conjunto com o microcomputador. O multiplexador possibilitou ao microcomputador ter acesso aos sinais do transdutor e do microfone alternadamente, enquanto o CAD discretizou estes sinais e os transformou em números binários. O multiplexador 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.

3.3.4 – Microcomputador

O microcomputador foi utilizado para receber os dados emitidos pelo microfone e transdutor, arquivá-los em tempo real e apresentar os dados experimentais em forma gráfica ao usuário. O microcomputador faz a interface entre o programa de aquisição de dados e a placa conversora ADA.

3.3.5 – Programa de Aquisição de Dados

O programa de aquisição de dados, elaborado em linguagem C, foi responsável por gerenciar o funcionamento dos equipamentos de forma a fornecer os dados organizados e de forma gráfica. A listagem do programa de aquisição de dados dos experimentos realizados encontra-se no Apêndice C.

Os programas de aquisição de dados apresentam 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 iniciar a aquisição de dados.
7. Variável *tempo1* assume o valor de *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 de dados.
 - Filtragem por média aritmética.
 - Conversão dos dados lidos em sinais digitais e posteriormente em unidades de amplitude (Volts) e pressão (kgf/cm²).
 - Variável *tempo2* assume o valor de *clock()*.
 - Cálculo do tempo de aquisição por ponto, subtraindo o valor das variáveis *tempo2* de *tempo1*.
 - Gravação do arquivo de resultados.
 - Apresentação na tela do microcomputador dos três valores obtidos em amplitude e do valor obtido em pressão.
 - Saída do *loop* de leitura.
 - Voltar ao início do *loop* de leitura.
11. Limpeza de tela.
12. Fim do programa de aquisição de dados.

3.3.6 – Conversão do Sinal Analógico em Digital

Como o microfone e o transdutor de pressão geram sinais de natureza analógica é necessária uma conversão do sinal analógico em sinal digital para que estes sinais possam ser compreendidos e trabalhados no programa de aquisição de dados.

O conversor A/D de 12 bits foi preparado para receber um sinal de entrada analógica de tensão variável de 0 a 5 Volts podendo gerar números binários de 0 (000000000000) a 4095 (111111111111) dependendo do sinal de entrada. O sinal de saída do conversor é proporcional à amplitude do sinal de 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 0 Volts na entrada do conversor tem-se o número decimal equivalente 0 e para 5 Volts, tem-se o número decimal equivalente a 4095. A relação entre a tensão de entrada (SA) e o número decimal (ND) é linear conforme a equação abaixo:

$$\frac{ND}{4095} = \frac{SA}{5} \quad (3.1)$$

Após a conversão, o número decimal equivalente foi transformado em unidades de tensão (Volts) para as três entradas relativas ao sinal do microfone, e em unidades de pressão (kgf/cm²) para o sinal proveniente do transdutor de pressão. Esta conversão é realizada na subrotina *leitura* no programa de aquisição de dados.

3.3.7 – Conversão do sinal analógico proveniente do microfone

Para uma dada leitura em Volts na entrada do conversor tem-se na saída o número decimal equivalente conforme a Equação 3.1. A amplitude proveniente dos sinais referentes ao microfone variam entre 0 e 5 Volts, portanto a equação de conversão de número decimal equivalente para o valor em Volts é feita no sentido inverso, conforme a equação 3.2.

$$A = 5 \cdot \left(\frac{ND_{eq}}{4095} \right) \quad (3.2)$$

onde A é a amplitude de cada filtro de frequência e ND_{eq} o número decimal equivalente à tensão de entrada.

3.3.8 – Conversão do sinal analógico proveniente do transdutor de pressão

Para uma dada leitura em Volts na entrada do conversor tem-se na saída o número decimal equivalente conforme a Equação 3.1. Como a variação do sinal do transdutor de pressão está entre 1 e 5 Volts, 1 Volt para a pressão inicial de 0 kgf/cm² e 5 Volts para a pressão inicial de 20 kgf/cm², deve-se mudar a referência de 0 para 1 Volt.

Através da Equação 3.1 encontramos o número decimal equivalente a 1 Volt.

$$ND_{eq} = \frac{1}{5} \cdot 4095 = 819 \quad (3.3)$$

O número decimal equivalente a 1 Volt é 819 e 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, tem-se a Equação 3.4.

$$P = 20 \cdot \left(\frac{ND_{eq} - 819}{4095 - 819} \right) \quad (3.4)$$

onde P é a pressão em kgf/cm² e ND_{eq} o número decimal equivalente à tensão de entrada.

3.3.9 – Temporização do programa de aquisição de dados

A temporização tem por finalidade determinar o intervalo de tempo gasto pelo computador para efetuar um laço de leitura no programa de aquisição de dados, que 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 locação destes dados em um arquivo. Para isto utilizou-se um relógio interno do microcomputador através da subrotina *clock()* e da biblioteca *time.h* da linguagem C.

O intervalo de tempo entre duas leituras sucessivas de um dado transdutor pode ser calculado de duas maneiras. A primeira é arquivar o valor de *clock()* como *tempo1* ao

iniciar a leitura e para cada final de uma leitura é associado um *tempo2*, a diferença entre *tempo1* e *tempo2* corresponde ao tempo gasto entre pontos sucessivos.

3.3.10 – Filtragem de dados

A filtragem dos dados possibilita a redução de ruídos gerados por instrumentos de medição, equipamentos elétricos, distância entre a instrumentação e a placa de aquisição AD ou variáveis do processo. Estes ruídos podem interferir na aquisição dos dados dificultando a identificação do vazamento. Neste trabalho utilizou-se um filtro por média aritmética e um filtro analógico.

Filtro por média aritmética: É calculado através da média de um determinado número de medidas sucessivas e este valor médio é considerado como sendo o valor filtrado de uma determinada variável, para o intervalo de tempo consumido durante as medidas. Para sistemas com ruídos de alta frequência a redução não é considerada satisfatória, assim a média aritmética é considerada como um pré-filtro em um sistema de aquisição de dados, sendo necessária a utilização de outro filtro.

Filtros analógicos: são circuitos elétricos cuja resposta em frequência, relativa ao ganho de tensão, tem valores significativos em faixas específicas de frequência. Foram utilizados dois tipos de filtros analógicos no experimento, o filtro passa-baixa e o filtro passa-faixa, mas apenas o filtro passa-baixa foi utilizado com a intenção de reduzir os ruídos, pois o filtro passa-faixa serviu na separação das frequências estabelecidas.

3.4 – Detecção de vazamentos. Condições de operação do sistema vaso-tubulação

3.4.1 – Detecção de vazamento sem alimentação contínua de ar

A primeira fase do trabalho constituiu-se na detecção de vazamentos no sistema fechado. Na prática, esta situação corresponderia à ocorrência de vazamentos em uma tubulação parada, isto é, aguardando requisição de demanda de gás por parte do consumidor.

Primeiramente a extremidade de saída da tubulação foi fechada e em seguida foi feita à instalação do orifício que controla a magnitude do vazamento e o sistema foi alimentado com ar comprimido a uma determinada pressão. O sistema foi isolado da linha central de ar comprimido, através de uma válvula gaveta e foi mantido fechado durante todo o experimento.

O programa de aquisição de dados foi iniciado e o vazamento foi então provocado manualmente a partir desta situação estática. O tempo do experimento foi suficiente para que a tubulação se esvaziasse por completo finalizando o programa de aquisição.

A primeira fase do trabalho foi realizada variando a pressão interna de ar no sistema de 2,0 a 7,0 kgf/cm²; a magnitude do vazamento de 0,4 a 5,0 mm e também a localização do microfone e do transdutor de pressão, que primeiramente se localizou no vaso de pressão e posteriormente à entrada da tubulação.

3.4.2 – Detecção de vazamento com alimentação contínua de ar

Na detecção de vazamento em tubulação com alimentação contínua de ar foi instalado um orifício de 0,8 mm na extremidade de saída da tubulação para mantê-la pressurizada. O orifício que controla a magnitude do vazamento foi colocado e em seguida a tubulação foi preenchida com ar comprimido a uma determinada pressão e mantida fixa durante todo o experimento através do regulador de pressão. A válvula de alimentação de ar também foi mantida aberta durante todo o experimento.

O programa de aquisição de dados foi iniciado e o vazamento foi provocado manualmente. O tempo de experimento foi o suficiente para que a tubulação voltasse a manter a pressão interna constante após a queda de pressão relativa à abertura da válvula e por fim o programa de aquisição de dados foi finalizado.

A segunda fase do trabalho foi realizada variando a pressão interna de ar no sistema, de 2,0 a 6,0 kgf/cm²; a magnitude do vazamento, de 1,0 a 5,0 mm e também a localização do microfone e do transdutor de pressão, que primeiramente se localizou no vaso de pressão e posteriormente à entrada da tubulação.

3.5 – Procedimento Experimental

O procedimento experimental foi dividido em duas fases, sendo cada fase composta por duas etapas. Na primeira fase foram realizadas duas etapas para a tubulação sem alimentação contínua de ar, a primeira com o microfone e o transdutor de pressão localizados no vaso de pressão e a segunda com o microfone e o transdutor de pressão, localizados à entrada da tubulação. Na segunda fase também foram realizadas duas etapas para a tubulação com alimentação contínua de ar, a primeira com o microfone e o transdutor de pressão localizados no vaso de pressão e o segundo com o microfone e o transdutor de pressão, localizados à entrada da tubulação. Os procedimentos experimentais foram:

3.5.1 – Tubulação sem alimentação contínua de ar

➤ Primeira Etapa:

1. Instalação do microfone e transdutor de pressão no vaso de pressão.
2. A extremidade final da tubulação é fechada.
3. Instalação do orifício que controla a magnitude do vazamento na tubulação.
4. É feito o preenchimento do sistema com ar comprimido a uma determinada pressão. A pressão foi variada de 2 a 7 kgf/cm² acima da pressão ambiente.
5. A válvula de alimentação é mantida fechada durante todo o experimento.
6. O programa de aquisição de dados é inicializado e é dado o nome do arquivo de resultados.
7. O vazamento é provocado manualmente.
8. O tempo de experimento foi o suficiente para que a tubulação adquira novamente a pressão ambiente.
9. O programa de aquisição é finalizado.

➤ Segunda Etapa:

1. Instalação do microfone e transdutor de pressão no início da tubulação.
2. A extremidade final da tubulação é fechada.
3. Instalação do orifício que controla a magnitude do vazamento na tubulação.
4. É feito o preenchimento do sistema com ar comprimido a uma determinada pressão. A pressão foi variada de 2 a 7 kgf/cm² acima da pressão ambiente.
5. A válvula de alimentação é mantida fechada durante todo o experimento.
6. O programa de aquisição de dados é inicializado e é dado o nome do arquivo de resultados.
7. O vazamento é provocado manualmente.
8. O tempo de experimento foi o suficiente para que a tubulação adquira novamente a pressão ambiente.
9. O programa de aquisição é finalizado.

3.5.2 – Tubulação com alimentação contínua de ar

➤ Primeira Etapa:

1. Instalação do microfone e transdutor de pressão no vaso de pressão.
2. É instalado o orifício de 0,8 mm na extremidade final da tubulação para mantê-la pressurizada.
3. Instalação do orifício que controla a magnitude do vazamento na tubulação.
4. É feito o preenchimento do sistema com ar comprimido a uma determinada pressão. A pressão foi variada de 2 a 6 kgf/cm² acima da pressão ambiente.
5. A válvula de alimentação é mantida aberta durante todo o experimento.
6. O programa de aquisição de dados é inicializado e é dado o nome do arquivo de resultados.

7. O vazamento é provocado manualmente.
8. O tempo de experimento foi o suficiente para que a tubulação voltasse a manter a pressão interna constante após a queda de pressão relativa à abertura da válvula.
9. O programa de aquisição é finalizado.

➤ Segunda Etapa:

1. Instalação do microfone e transdutor de pressão no início da tubulação.
2. É instalado o orifício de 0,8 mm na extremidade final da tubulação para mantê-la pressurizada.
3. Instalação do orifício que controla a magnitude do vazamento na tubulação.
4. É feito o preenchimento do sistema com ar comprimido a uma determinada pressão. A pressão foi variada de 2 a 6 kgf/cm² acima da pressão ambiente.
5. A válvula de alimentação é mantida aberta durante todo o experimento.
6. O programa de aquisição de dados é inicializado e é dado o nome do arquivo de resultados.
7. O vazamento é provocado manualmente.
8. O tempo de experimento foi o suficiente para que a tubulação voltasse a manter a pressão interna constante após a queda de pressão relativa à abertura da válvula.
9. O programa de aquisição é finalizado.

4 . RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Detecção de vazamentos sem alimentação contínua de ar

4.1.1 – Transdutor de pressão e microfone instalados no vaso de pressão

As Figuras 4.2 a 4.8 mostram os transientes de pressão e as variações das amplitudes dos ruídos sonoros gerados por vazamentos na tubulação isolada utilizando-se orifícios de 0,4 a 5,0 mm de diâmetro, a pressões iniciais de 4 kgf/cm² e 7 kgf/cm². Os demais resultados encontram-se no Apêndice A.

Muito embora o instante exato em que o vazamento foi provocado não foi o mesmo para todos os experimentos, o tempo de duração de cada experimento foi o suficiente para que o sistema vaso de pressão – tubulação esvaziasse totalmente.

Os resultados obtidos mostraram que no exato instante em que o vazamento foi provocado, a pressão interna da tubulação diminui continuamente em função do tempo. A amplitude do ruído sonoro aumentou bruscamente e em seguida diminuiu com o esvaziamento do sistema vaso – tubulação.

Em todos os casos a ocorrência de vazamento é nitidamente detectada através dos perfis de transientes de pressão e também através das variações das amplitudes dos ruídos sonoros. De um modo geral, os valores de amplitude do ruído sonoro durante os experimentos são maiores quanto maior é a pressão.

A Figura 4.2 mostra os resultados experimentais quando o vazamento foi provocado através de um orifício de 0,4 mm, a pressões iniciais de 4 e 7 kgf/cm².

O tempo em que à tubulação se esvaziou foi em torno de 4000 e 5000 segundos, respectivamente e a frequência dominante, correspondente ao ruído pelo vazamento, foi de 9 kHz. Os dados de amplitude sonora na Figura 4.2 correspondem a um ganho de 8 no circuito banco de filtros passa faixa.

Para a detecção do vazamento provocado através de um orifício de 1,0 mm (Figura 4.3) utilizou-se ganho de 2 no circuito banco de filtros passa faixa.

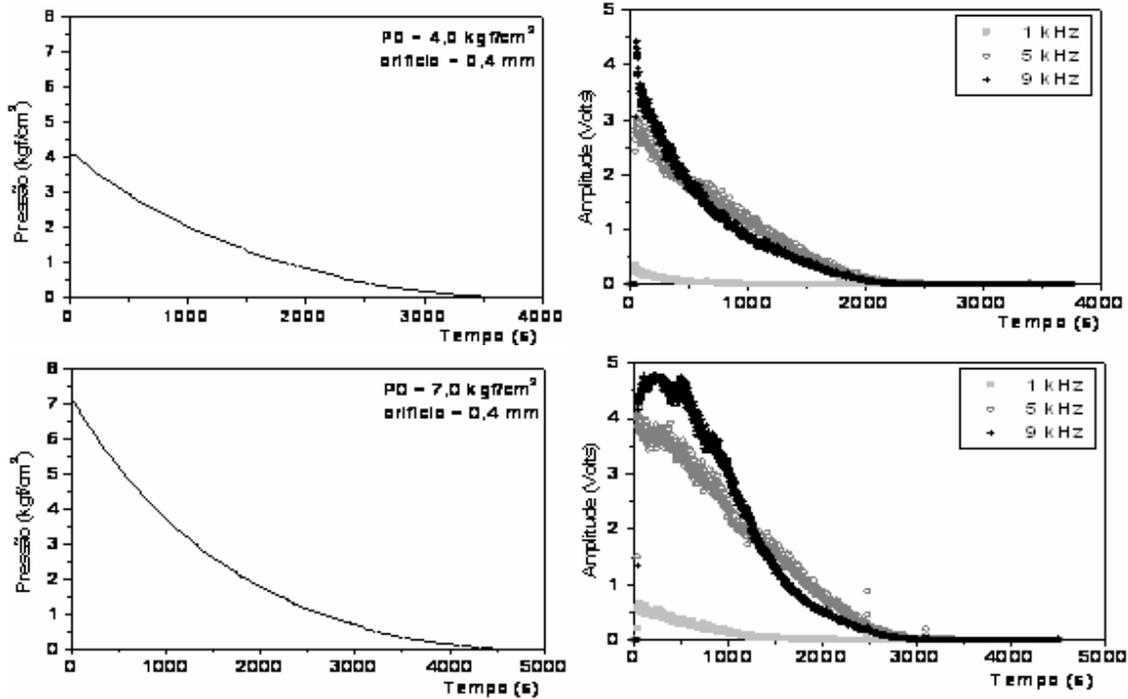


Figura 4.2 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 0,4 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

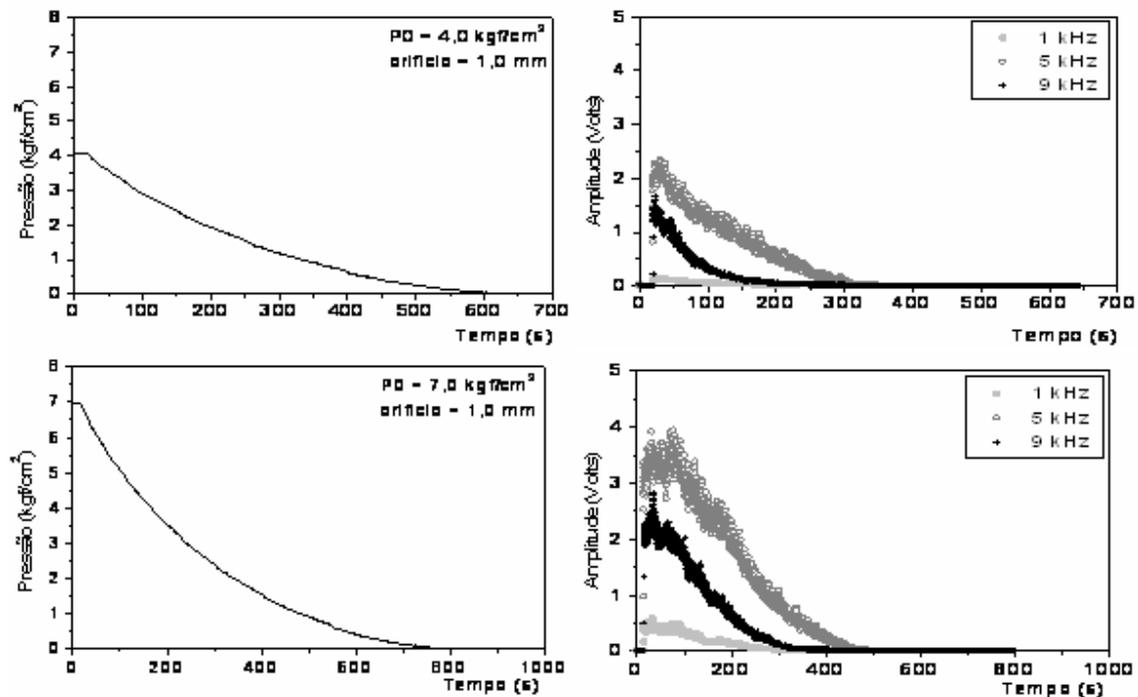


Figura 4.3 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

Com um ruído mais grave do que aquele do orifício de 0,4 mm, a frequência dominante passou a ser de 5 kHz e o tempo para que a tubulação esvaziasse foi de 700 e 1000 segundos, para as pressões iniciais de 4 e 7 kgf/cm², respectivamente. Quanto maior o orifício através do qual ocorreu o vazamento, mais rápida foi a queda na pressão.

O aumento do diâmetro do orifício utilizado no vazamento aumenta a amplitude do ruído sonoro gerado, sendo necessário alterar o ganho no circuito banco de filtros passa faixa.

Nos experimentos mostrados na Figuras 4.4 a 4.8, correspondentes aos orifícios de 1,5mm, 2,0 mm, 3,0mm, 4,0mm e 5,0mm, utilizou-se ganho de 1 no circuito banco de filtros passa-faixa para se obter uma leitura adequada das amplitudes em frequência geradas pela ocorrência do vazamento.

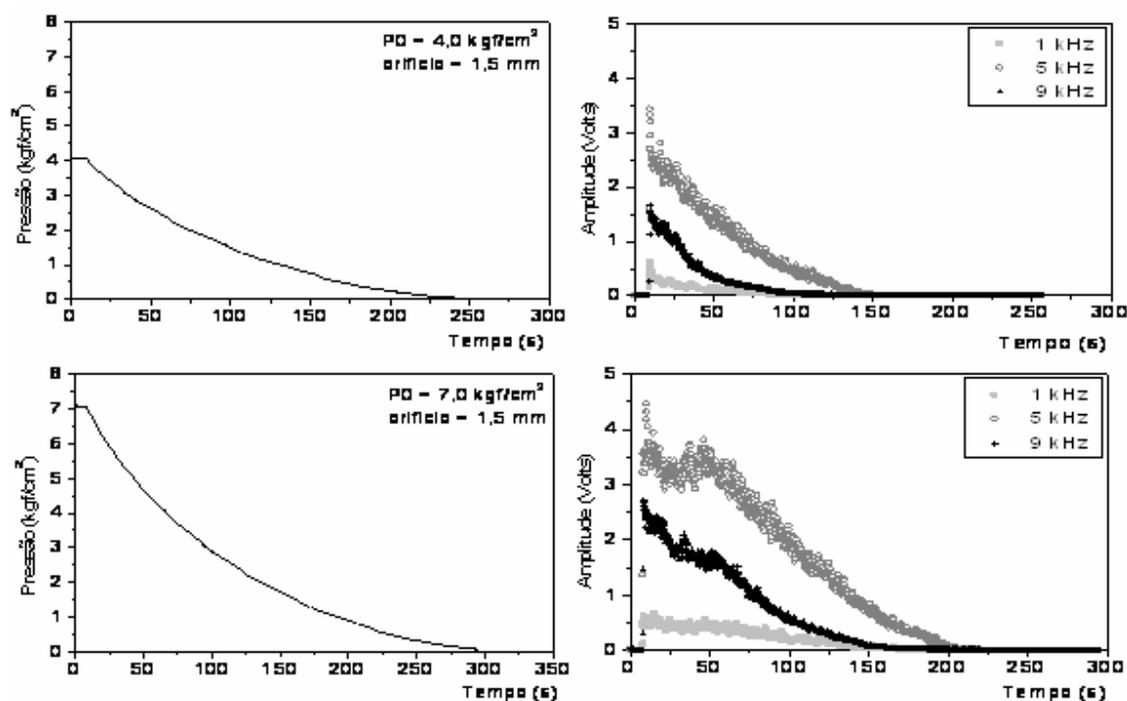


Figura 4.4 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,5 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

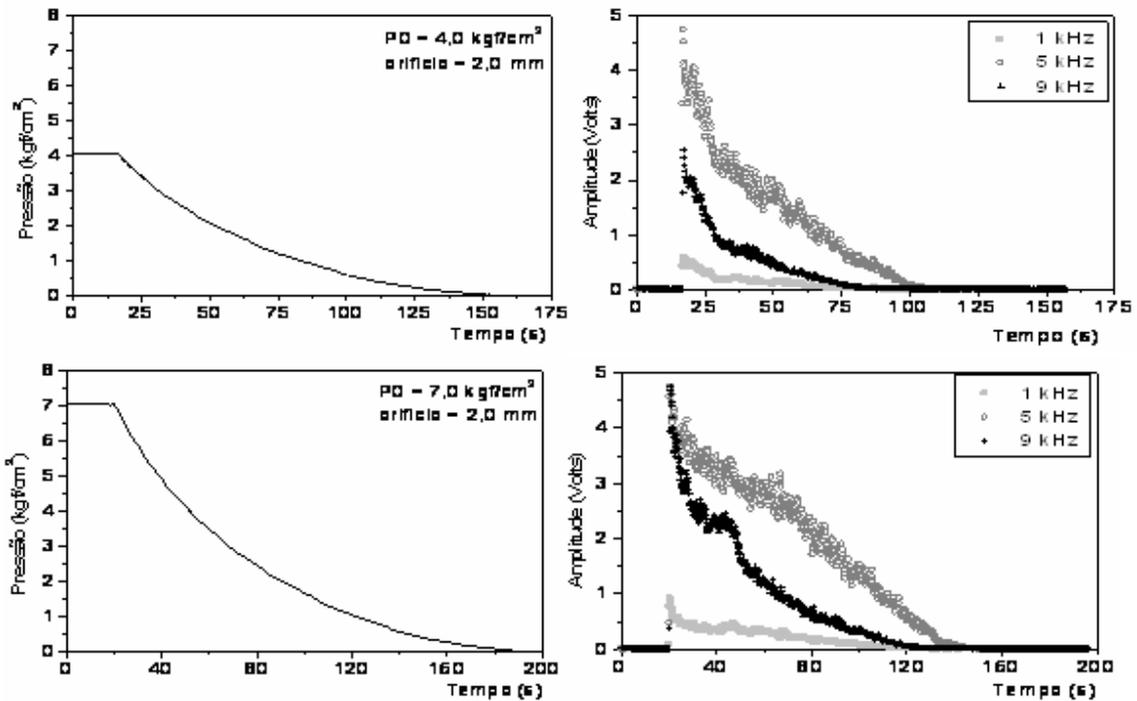


Figura 4.5 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 2,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

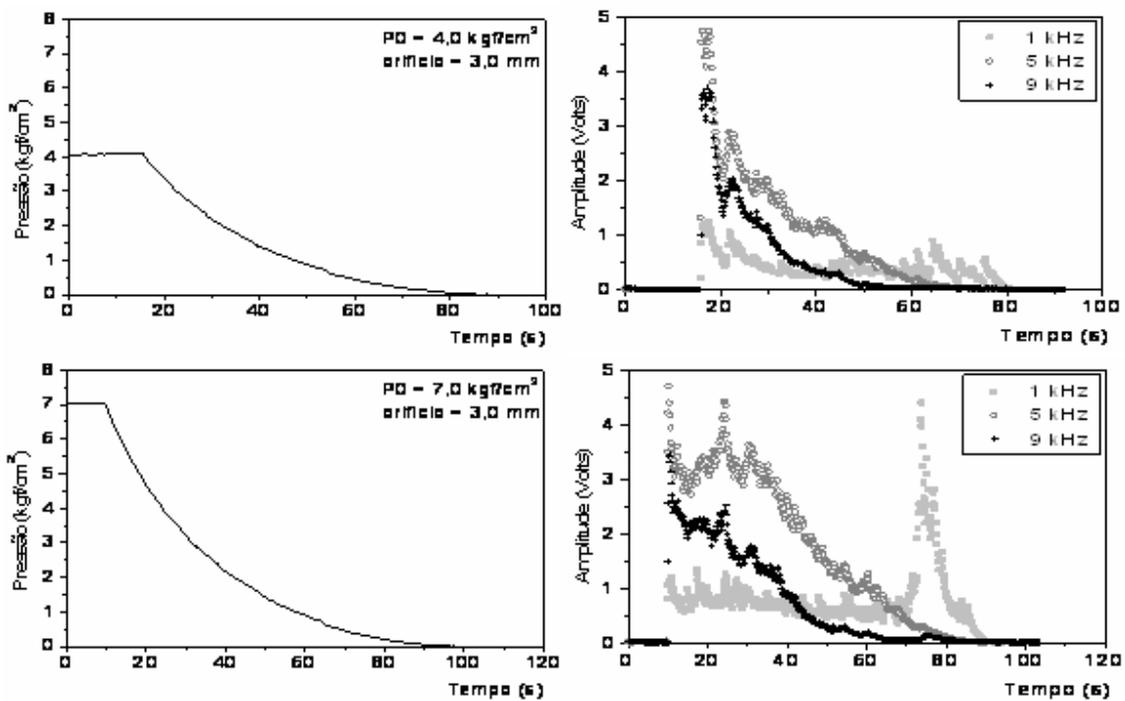


Figura 4.6 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 3,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

A amplitude do ruído sonoro também aumentou com o aumento do diâmetro do orifício para uma mesma pressão inicial. Para a pressão inicial de 4 kgf/cm² a amplitude da frequência dominante chegou a 3,0 Volts com o orifício de 1,5 mm (Figura 4.4), enquanto que utilizando-se o orifício de 2,0 mm (Figura 4.5) a amplitude da frequência dominante chegou a 4,5 Volts.

Cada orifício apresentou uma resposta específica em termos de perfil de amplitude e de frequência dominante do ruído sonoro gerado pelo vazamento. A influência do tamanho do orifício sobre a variação da amplitude do ruído em função do tempo foi menor para orifícios maiores do que 2,0 mm (Figuras 4.5 a 4.8)

O aumento do orifício também alterou a frequência dominante no sistema, o som agudo foi obtido quando se utilizou um orifício de 0,4 mm e quando se utilizou o orifício de 5,0 mm obteve-se um som mais grave. Com o orifício de 0,4 mm a frequência dominante foi de 9 kHz (Figura 4.2), enquanto que com orifícios entre 1,0 e 3,0 mm a frequência dominante foi de 5kHz (Figuras 4.3 a 4.6). Com o orifício de 4,0 mm ocorreu uma transição na frequência dominante (Figura 4.7), e com o orifício de 5,0 mm a frequência dominante foi de 1 kHz (Figura 4.8).

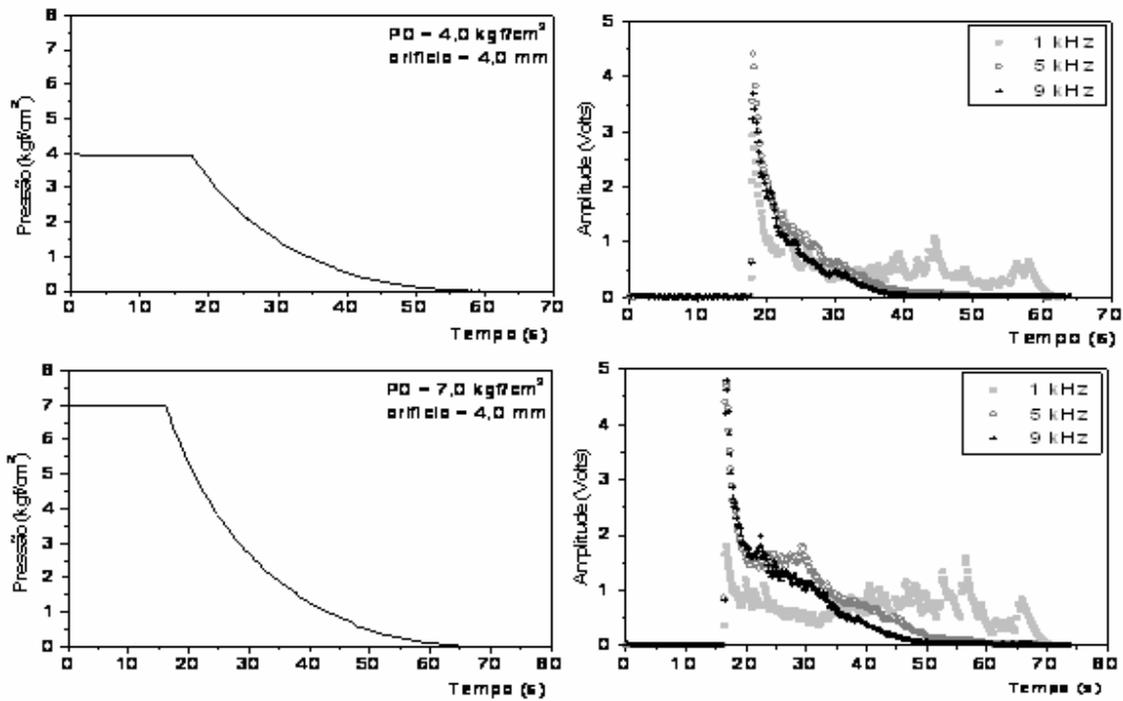


Figura 4.7 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 4,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

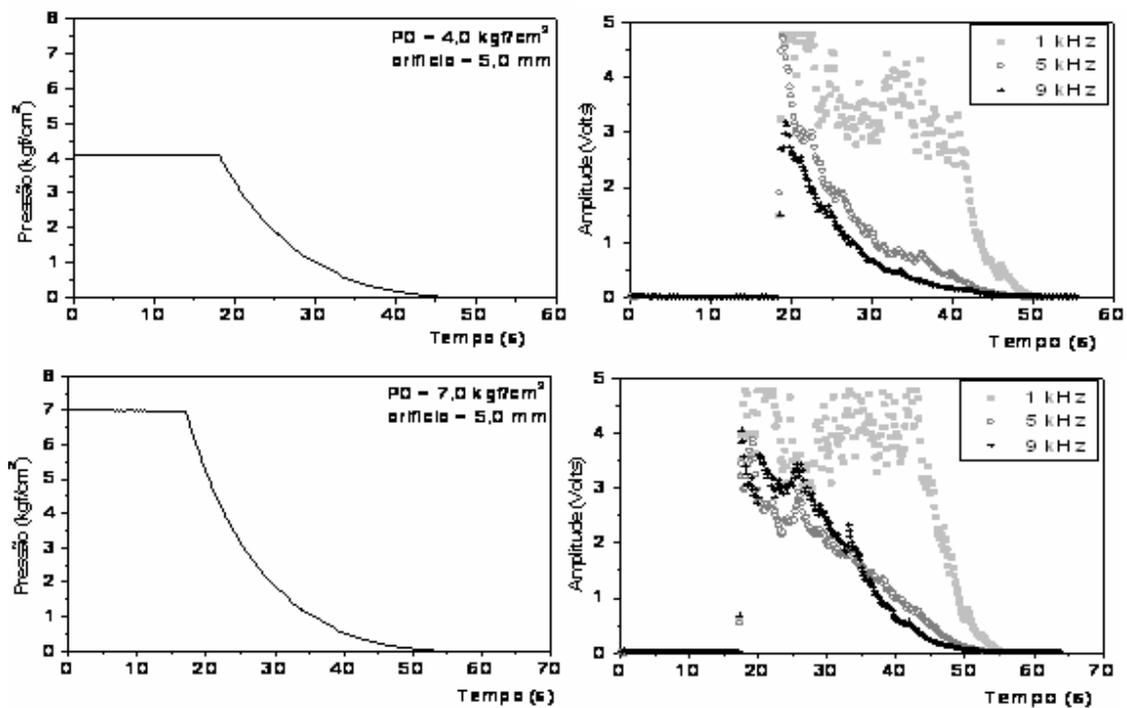


Figura 4.9 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 5,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

4.1.2 - Transdutor de pressão e microfone instalados à entrada da tubulação

As Figuras 4.9 a 4.15 mostram a variação da pressão no sistema vaso-tubulação juntamente com as amplitudes do ruído sonoro gerado por vazamentos na tubulação utilizando orifícios de 0,8 mm a 5,0 mm de diâmetro, a pressões iniciais de 4 kgf/cm² e 7kgf/cm². O tempo de duração de cada experimento foi o suficiente para que o sistema vaso de pressão – tubulação esvaziasse totalmente. Os demais perfis de transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro encontram-se no Apêndice A.

Os resultados obtidos mostram que as características dos transientes de pressão, bem como a influência do diâmetro do orifício sobre a variação de pressão, são as mesmas daquelas observadas quando o transdutor estava instalado no vaso de pressão. O mesmo não ocorreu com as amplitudes dos ruídos sonoros gerados pelos vazamentos.

De um modo geral, a amplitude do ruído sonoro sofre um pulso no instante em que o vazamento é provocado e oscila durante a maior parte do experimento, para finalmente diminuir nos últimos instantes do esvaziamento do sistema vaso-tubulação.

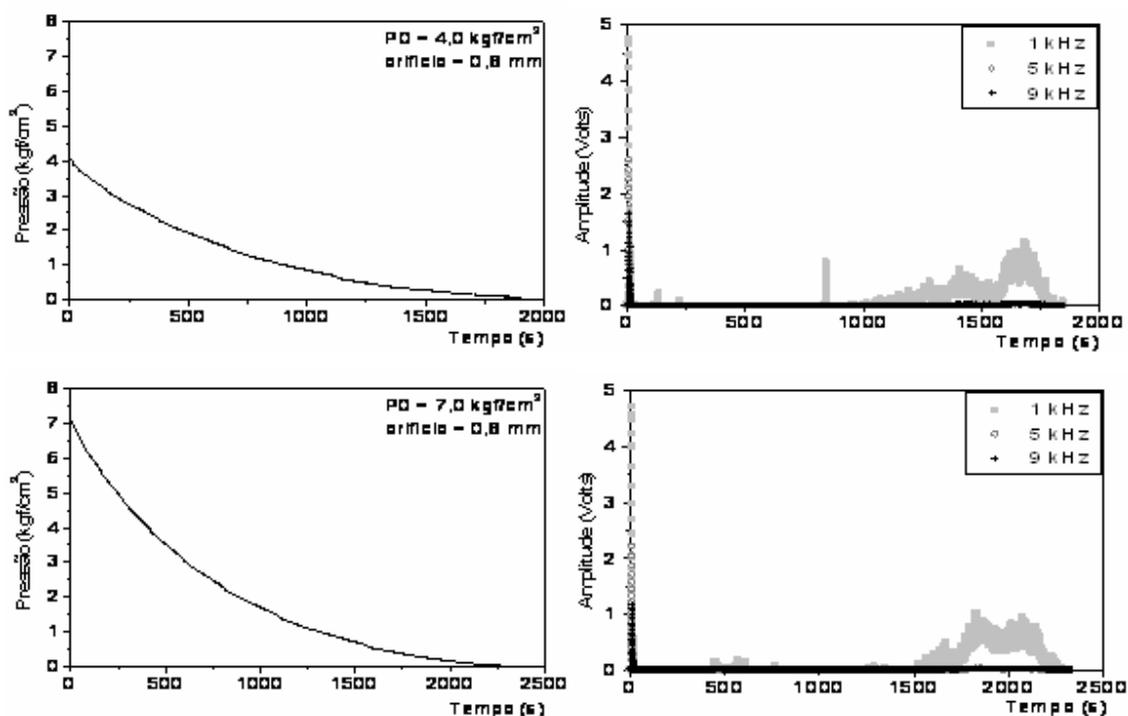


Figura 4.9 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 0,8 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

Inicialmente o ganho foi mantido em 8 para a experiência realizada com o orifício de 0,8 mm (Figura 4.9). Com o aumento do orifício houve o aumento da amplitude do ruído sonoro sendo necessário diminuir o ganho como apresentado na Figura 4.10, onde se utilizou um ganho 4 para um orifício de 1,0 mm. Para as condições utilizadas com os orifícios de 0,8 mm e 1,0 mm não há uma definição muito clara da frequência dominante. Esta, no entanto, tende para 1 kHz, isto é um ruído de som grave.

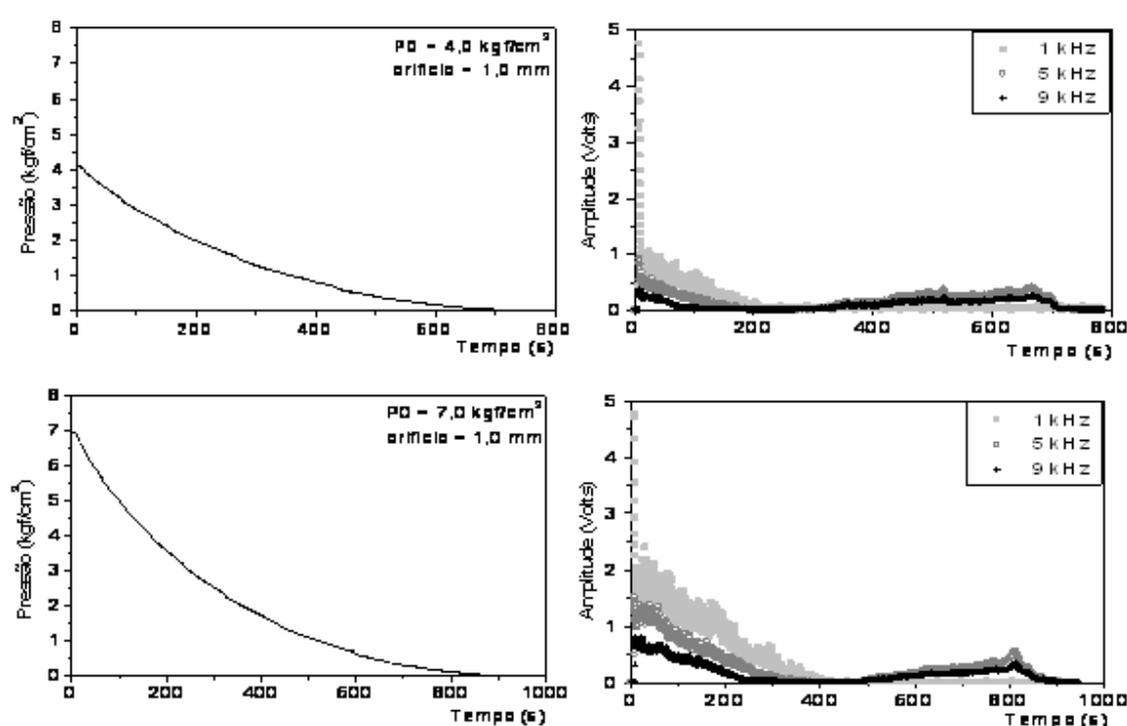


Figura 4.10 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

Para os orifícios de 1,5 mm e 2,0 mm foi utilizado um ganho de 1 no banco de filtros passa faixa, para se obter uma leitura adequada da amplitude do ruído.

Para o mesmo ganho no banco de filtros passa faixa o aumento do diâmetro do orifício também aumentou a amplitude do ruído sonoro gerado. Para a pressão de 4 kgf/cm² a frequência dominante foi até 3 Volts com o orifício de 1,5 mm (Figura 4.11), enquanto que com o orifício de 2,0 mm (Figura 4.12) a frequência dominante chegou a 4 Volts.

A partir do orifício de 1,5 mm ocorre uma definição da frequência dominante do ruído do vazamento. Isto é, com o microfone e transdutor instalados à entrada da tubulação e próximos do vazamento, a frequência dominante passa a ser de 1 kHz, indicando que o ruído tem som mais grave.

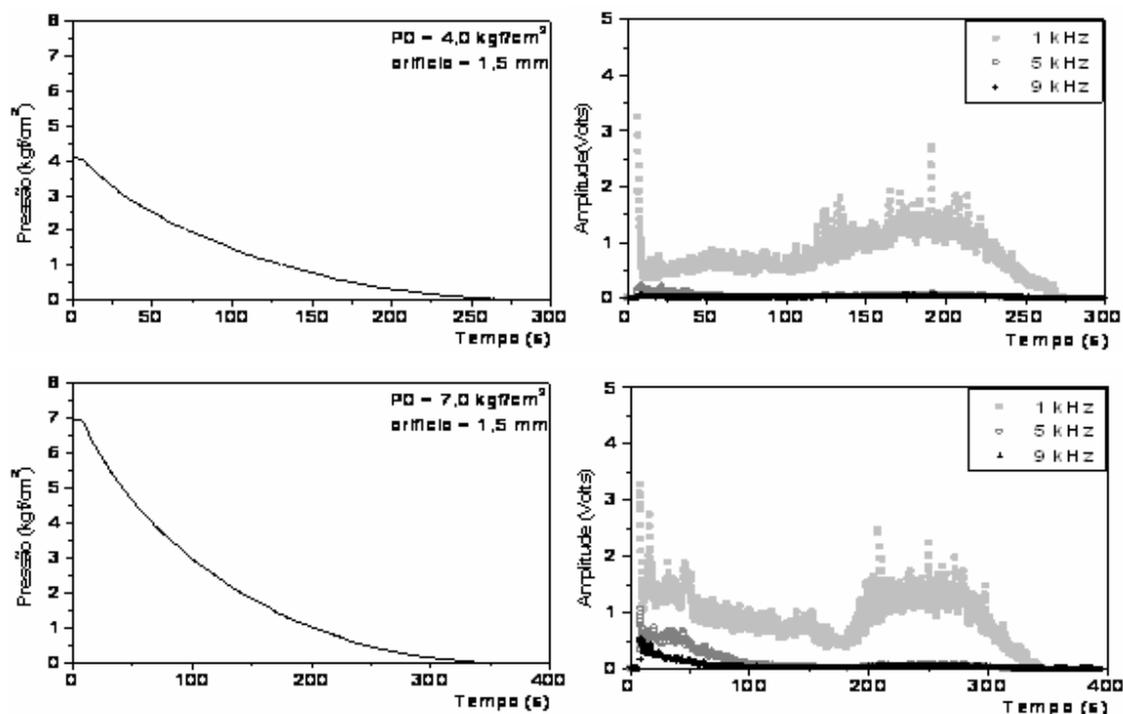


Figura 4.11 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,5 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

As Figuras 4.5 e 4.12 mostram os resultados para o mesmo diâmetro de orifício de 2,0 mm, e mesmas pressões iniciais de 4 e 7 kgf/cm², o mesmo ganho de 1 no banco de filtros passa faixa, mas localizações diferentes do microfone e transdutor de pressão.

Comparando estas Figuras observou-se claramente a diferença no comportamento das amplitudes dos ruídos em função do tempo, durante a realização do experimento. A Figura 4.5 apresentou uma frequência dominante de 5 kHz indicando um som grave, enquanto que a Figura 4.12 apresentou uma frequência dominante de 1 kHz indicando um som muito mais grave.

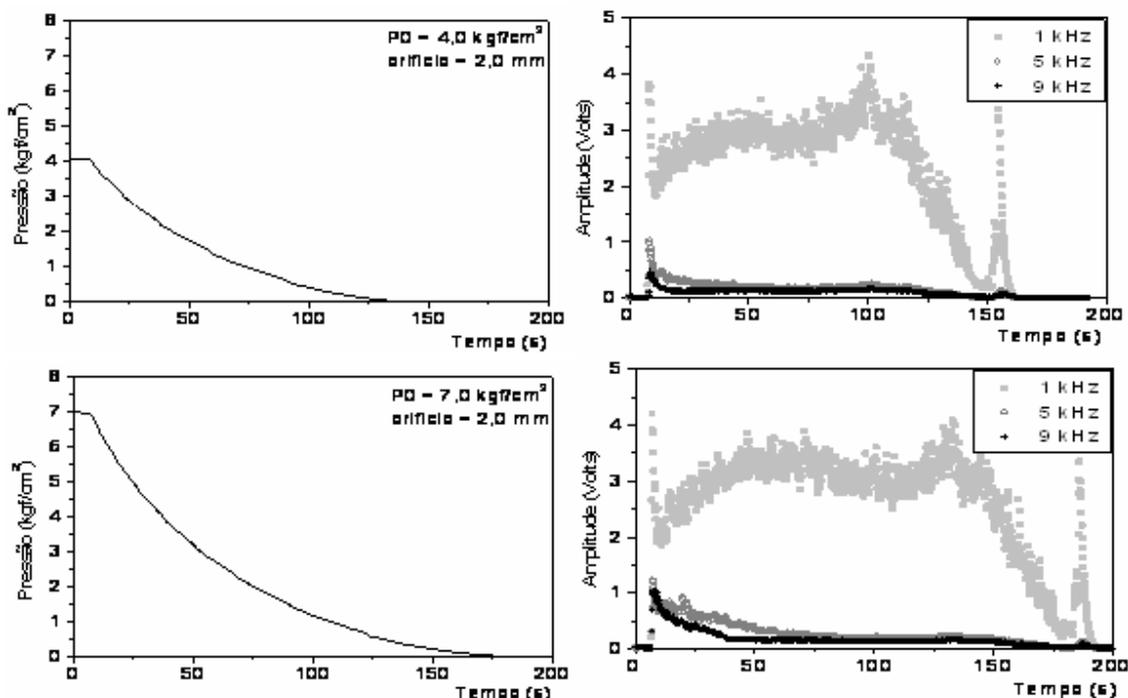


Figura 4.12 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 2,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

Para os orifícios de 3,0 mm; 4,0 mm e 5,0 mm o ganho foi de 0,1 no banco de filtros passa faixa. As amplitudes aumentaram em função do aumento do orifício. A frequência dominante com os orifícios de 3,0 mm, 4,0 mm e 5,0 mm (Figuras 4.13 a 4.15) também foi de 1 kHz, indicando um som muito mais grave em relação às Figuras 4.6 a 4.8.

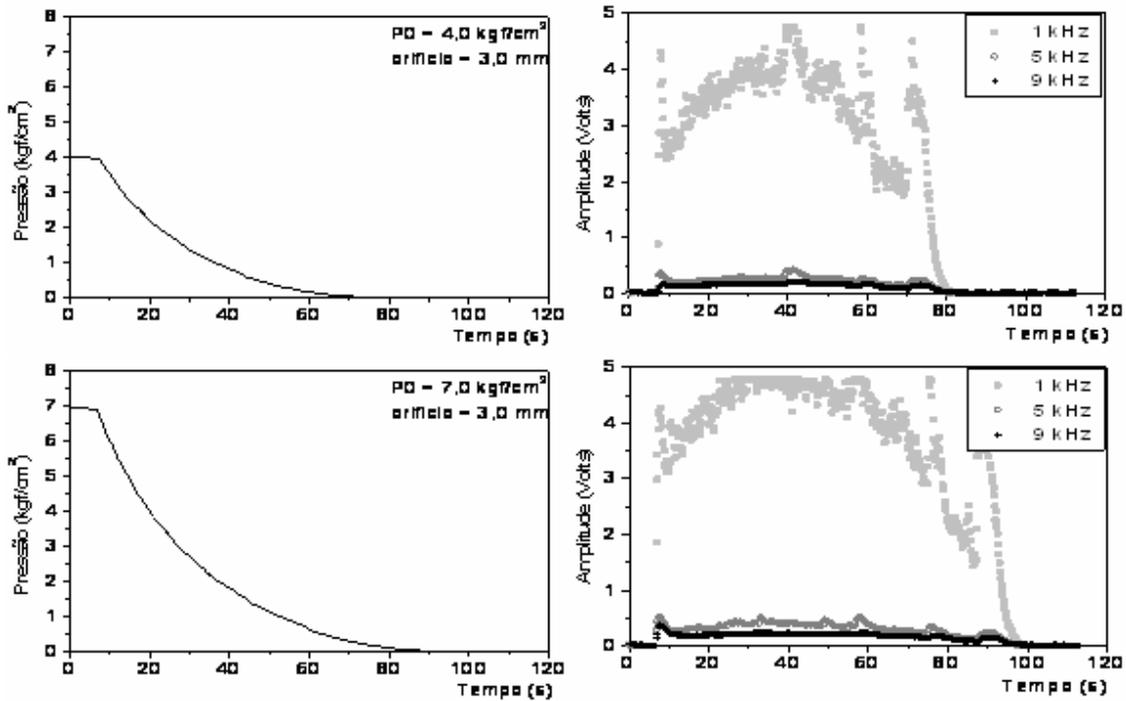


Figura 4.13 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 3,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

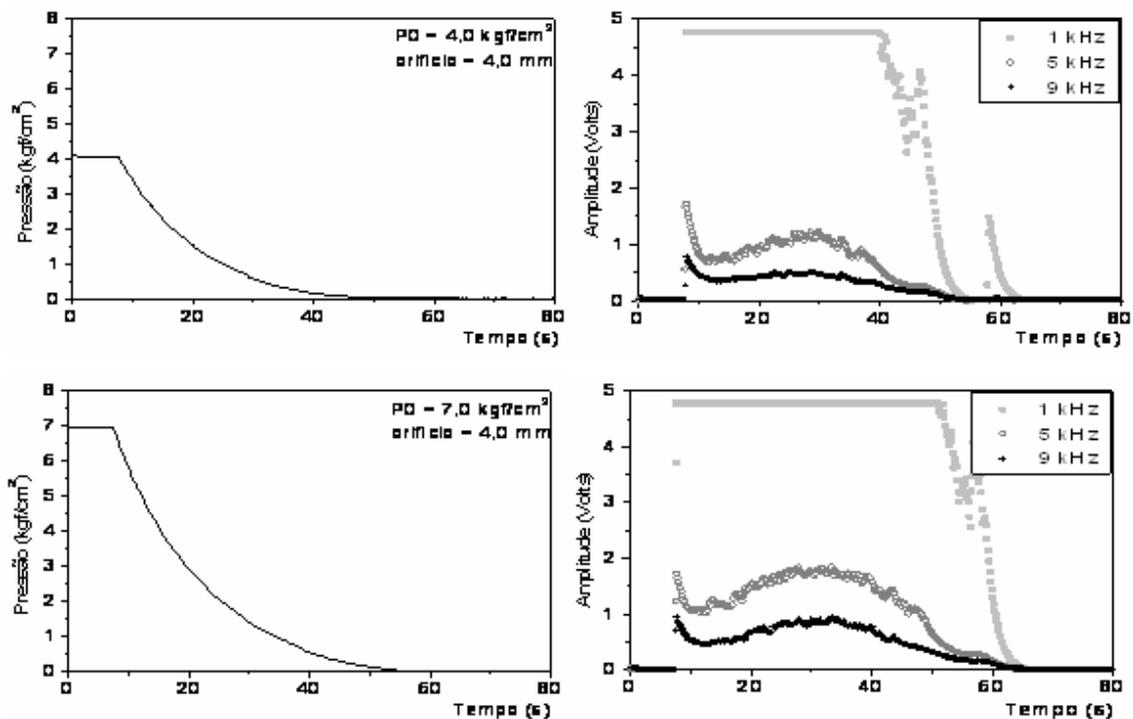


Figura 4.14 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 4,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

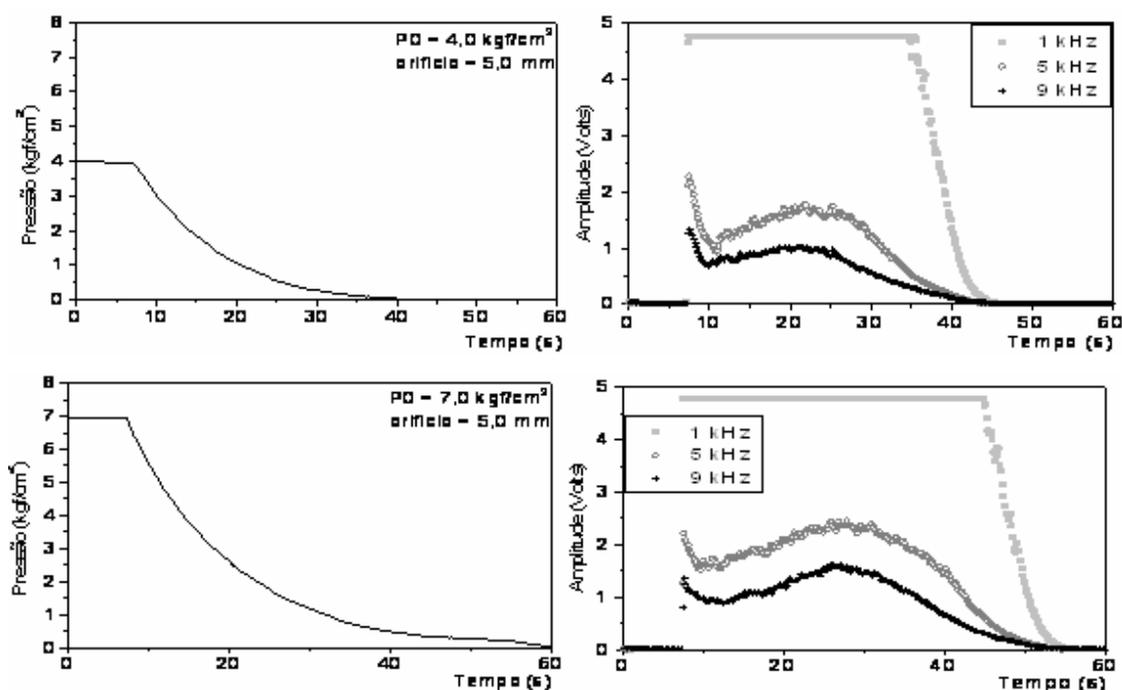


Figura 4.15 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 5,0 mm. Tubulação sem alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

Os resultados obtidos com o sistema vaso-tubulação isolados, sem alimentação contínua de ar, mostram que a detecção de vazamentos mesmo da ordem de 0,4 mm são nitidamente detectados através dos transientes de pressão e das variações das amplitudes dos ruídos sonoros gerados pelo vazamento.

A proximidade entre o vaso de pressão e a entrada da tubulação proporcionou perfis de transiente de pressão praticamente idênticos quer o transdutor estivesse no vaso quer estivesse à entrada da tubulação.

A posição do microfone no sistema, no entanto, permitiu a captação de ruídos sonoros gerados pelo vazamento com características distintas, como um som agudo para o orifício de 0,4 mm (frequência de 9 kHz) e grave para o de 5,0 mm (frequência de 1 kHz) quando o microfone estava instalado no vaso, e como um som grave (frequência de 1 kHz), para toda a faixa de diâmetro de orifícios utilizada quando o microfone estava instalado à entrada da tubulação.

4.2 – Detecção de vazamentos com alimentação contínua de ar

4.2.1 – Transdutor de pressão e microfone instalados no vaso de pressão

As Figuras 4.16 a 4.21 mostram a variação da pressão juntamente com as amplitudes dos ruídos sonoros gerados por vazamentos na tubulação, utilizando orifícios de 1,0 mm a 5,0 mm de diâmetro, a pressões iniciais de 4 kgf/cm² e 6kgf/cm². Para esta fase do trabalho, o orifício de 0,8 mm foi instalado na extremidade de saída da tubulação para mantê-la pressurizada. Os demais perfis de transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro encontram-se no Apêndice B.

No momento em que o vazamento foi provocado a pressão na tubulação sofreu uma redução, no entanto, a característica dos perfis de transiente de pressão dependeu do diâmetro do orifício. A amplitude do ruído sonoro aumentou bruscamente, caracterizando a ocorrência de vazamento.

As Figuras 4.16 a 4.18 mostram os transientes de pressão e a amplitude do ruído sonoro, quando o vazamento ocorreu através dos orifícios de 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm, respectivamente.

Nestes casos, a ocorrência de vazamento não provocou alteração significativa no valor da pressão, de modo que o vazamento pudesse ser prontamente detectado. Em alguns casos a presença do vazamento é praticamente imperceptível.

Ao contrário da pressão, a amplitude do ruído sonoro permitiu a nítida detecção do vazamento. A amplitude aumentou bruscamente, permanecendo relativamente constante durante o vazamento. O ganho foi de 1 no circuito banco de filtros passa faixa e a frequência dominante foi de 5 kHz para as Figuras 4.16 a 4.18.

Foi observado nestas Figuras que há uma pequena variação em amplitude das frequências antes do vazamento ser provocado, conhecido como ruído de fundo. Isto ocorre devido ao ruído provocado pela expansão do gás ao entrar no sistema que também é captado pelo microfone quando o ganho foi de 1 no banco de filtros passa faixa.

Este ruído de fundo não interfere na detecção do vazamento, pois quando o vazamento é provocado há uma alteração brusca de sinal de amplitude.

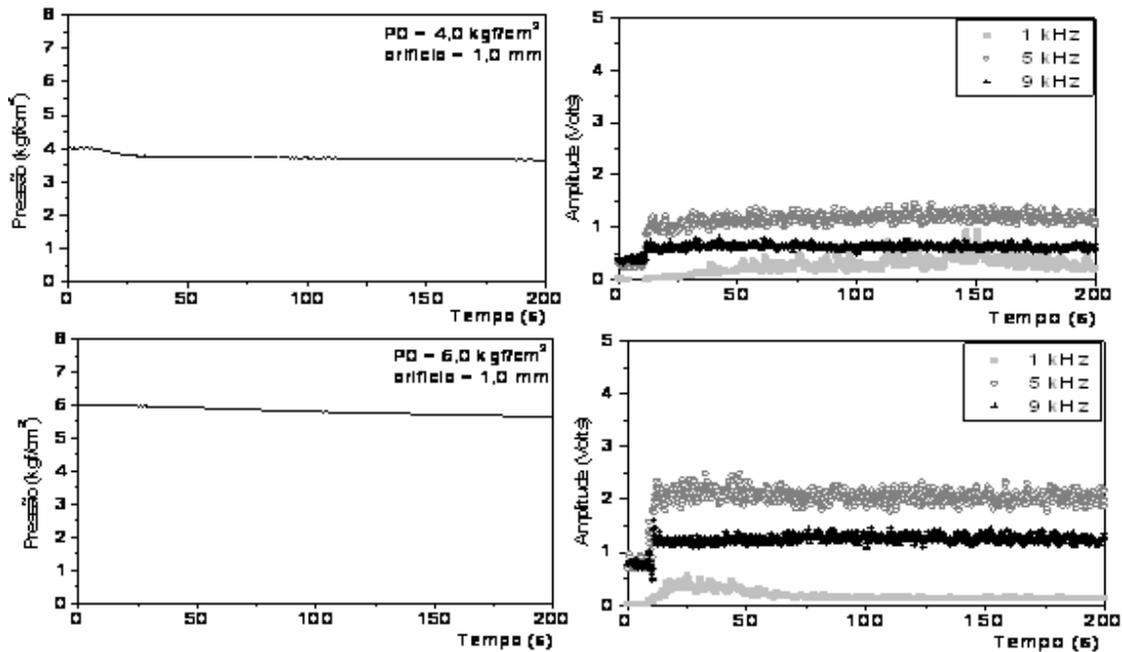


Figura 4.16 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

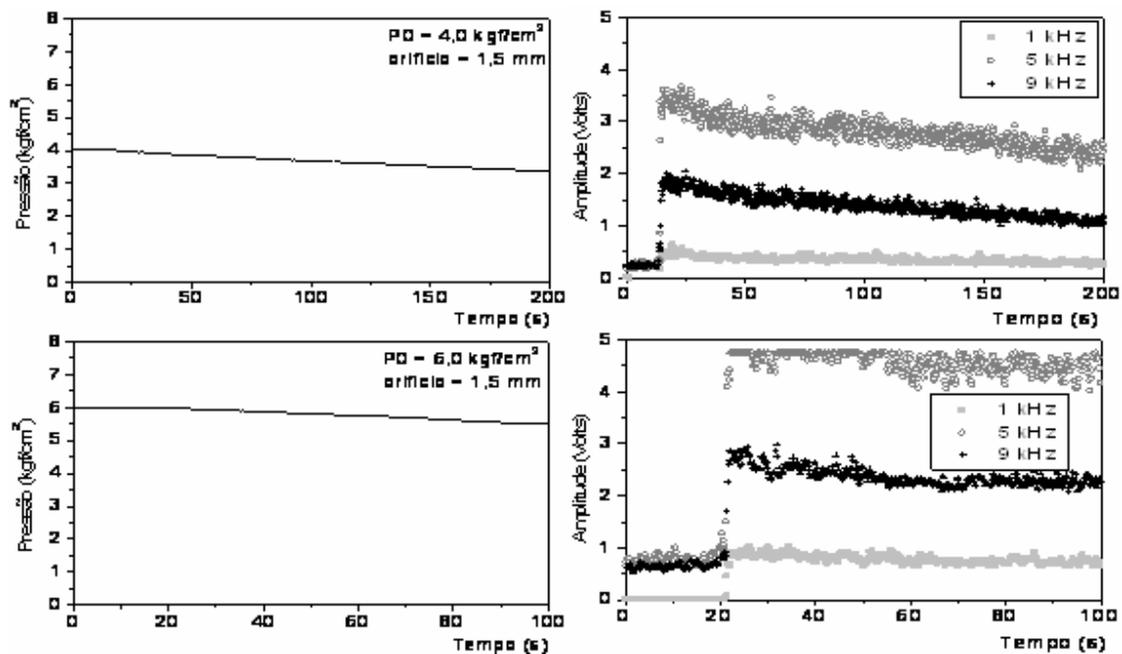


Figura 4.17 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,5 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

A Figura 4.17 apresentou variações em amplitude nas frequências geradas quando se variou a pressão interna da tubulação. A uma pressão inicial de 4 kgf/cm² a amplitude da frequência dominante não ultrapassou 4 Volts enquanto que para uma pressão inicial de 6 kgf/cm² a amplitude da frequência dominante chegou a 4,75 Volts.

Para o mesmo ganho no banco de filtros passa faixa o aumento na magnitude do diâmetro do orifício também aumentou a amplitude do ruído sonoro gerado. Para a pressão de 4 kgf/cm² a frequência dominante não ultrapassou 3,5 Volts com o orifício de 1,5 mm (Figura 4.17), enquanto que com o orifício de 2,0 mm (Figura 4.18) a frequência dominante chegou a 4,75 Volts.

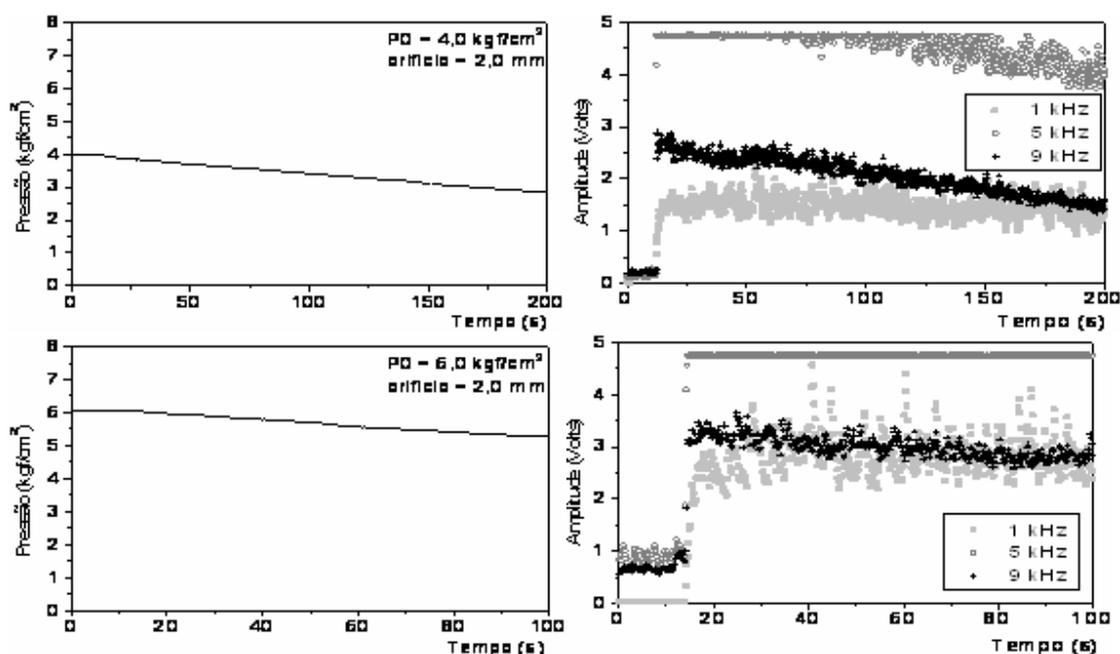


Figura 4.18 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 2,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

Para que os valores da amplitude em frequência não ultrapassassem mais o valor máximo que a placa de aquisição A/D pode converter o ganho no circuito banco de filtros passa faixa foi ajustado em 0,1 para as Figuras de 4.19 a 4.21.

Para os orifícios de 3,0mm, 4,0mm 5,0 mm a queda de pressão foi brusca no momento em que a válvula de vazamento foi aberta e em seguida foi estabilizada. Esta

queda brusca de pressão no momento em que ocorre o vazamento é caracterizada pelo impacto mais forte no qual a onda de pressão sofre quando os vazamentos são de magnitudes maiores.

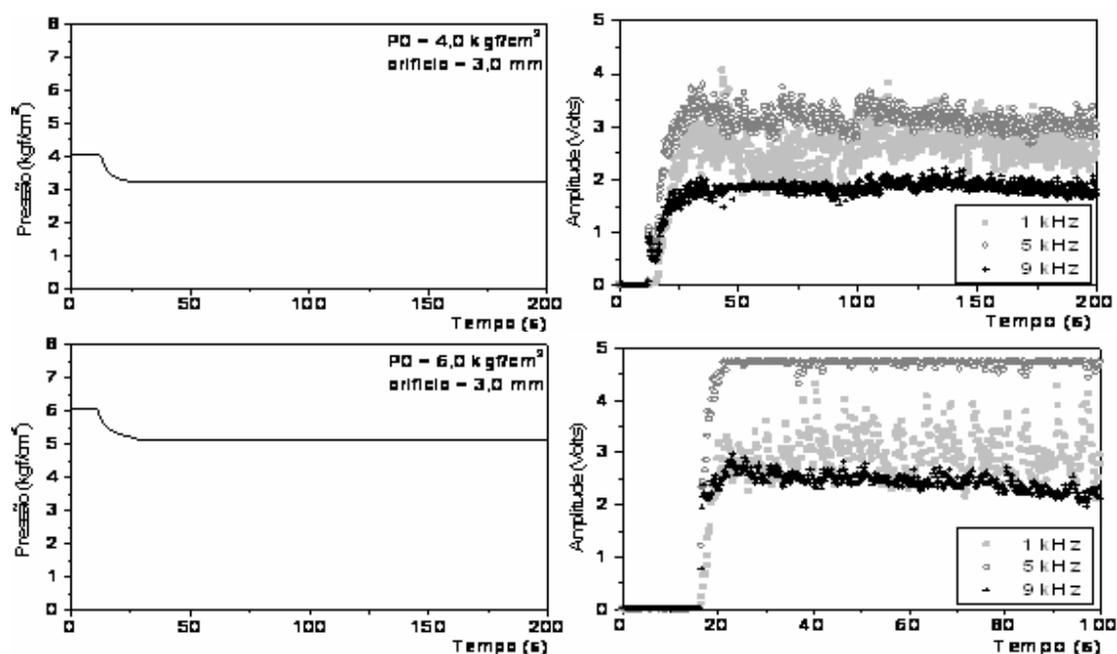


Figura 4.19 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 3,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

As pressões iniciais internas apresentadas nas Figuras 4.20 e 4.21 ultrapassaram novamente o limite em que a placa de aquisição pode converter. Entretanto este tipo de resposta não influencia na detecção do vazamento, uma vez que antes do vazamento ser provocado, as amplitudes dos filtros de frequências são nulas como apresentadas nas Figuras 4.19 a 4.21 e, após o vazamento essas amplitudes passam a ter certa grandeza. Este aumento na amplitude é significativo para poder detectar a ocorrência de vazamento na tubulação com escoamento contínuo de gás.

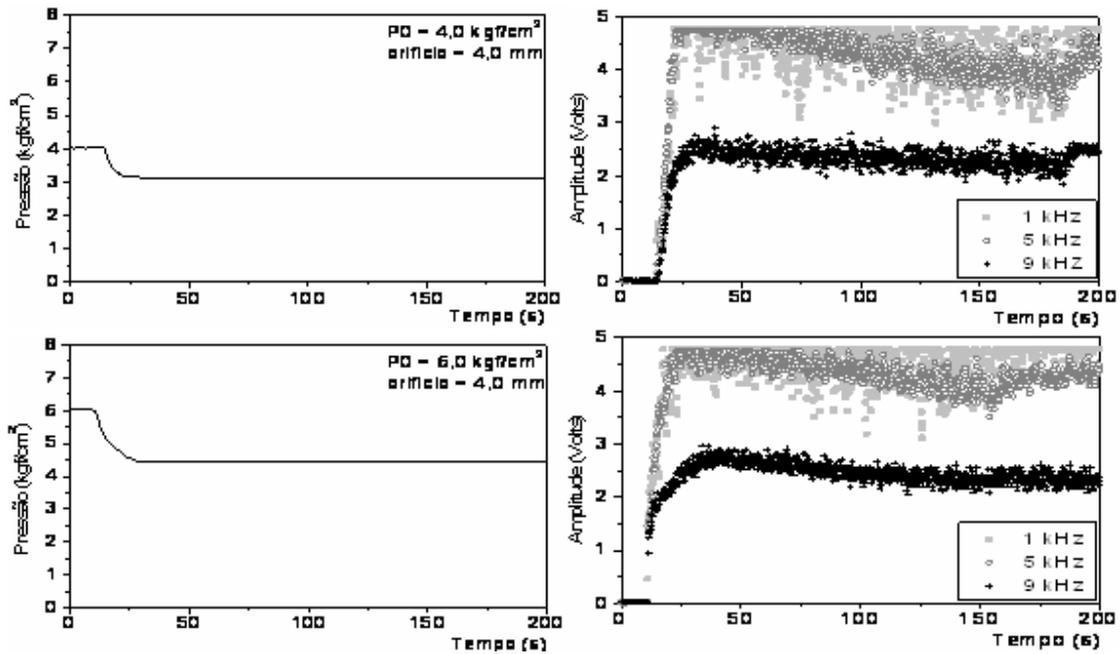


Figura 4.20 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 4,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

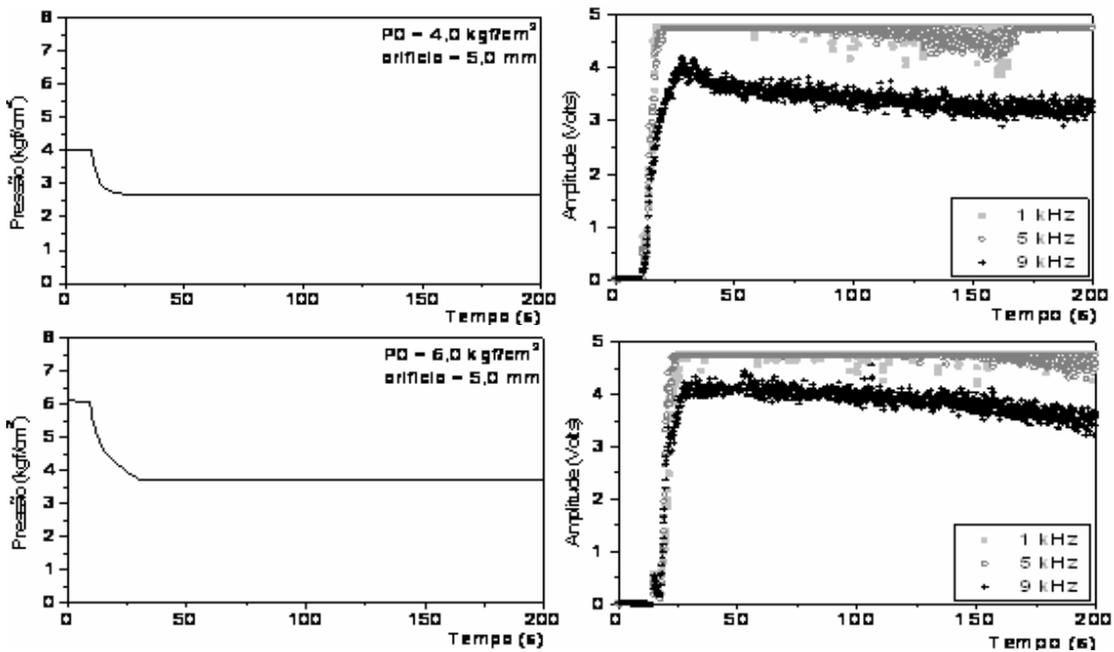


Figura 4.21 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 5,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no vaso de pressão.

4.2.2 – Transdutor de pressão e microfone instalados à entrada da tubulação

As Figuras 4.22 a 4.27 mostram a variação da pressão interna juntamente com as amplitudes dos ruídos sonoros gerados por vazamentos na tubulação, utilizando orifícios de 1,0 mm a 5,0 mm de diâmetro, a pressões iniciais de 4 kgf/cm² e 6 kgf/cm². Foi mantido o orifício de 0,8 mm na extremidade de saída da tubulação para mantê-la pressurizada. Os demais perfis de transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro encontram-se no Apêndice B.

Como na etapa anterior, no momento em que o vazamento foi provocado a pressão na tubulação sofreu uma redução, no entanto, a característica dos perfis de transiente de pressão dependeu do diâmetro do orifício e a amplitude do ruído sonoro aumentou bruscamente, caracterizando a ocorrência de vazamento.

A Figura 4.22, que corresponde ao orifício de 1,0 mm, foi utilizado um ganho de 4 no banco de filtros passa faixa para possibilitar uma leitura correta do ruído sonoro gerado pelo vazamento.

Neste caso, a ocorrência de vazamento não provocou uma alteração significativa no valor da pressão, de modo que o vazamento pudesse ser prontamente detectado. Entretanto, a amplitude do ruído sonoro permitiu a nítida detecção do vazamento. A amplitude aumentou bruscamente, atingindo o limite em que a placa de aquisição pode converter o sinal e depois permaneceu relativamente constante na faixa de 3 Volts durante o vazamento.

A Figura 4.22 também apresentou uma variação em amplitude das frequências antes do vazamento ser provocado. Este ruído de fundo foi captado pelo microfone devido ao ganho estar em 4 no banco de filtros passa faixa.

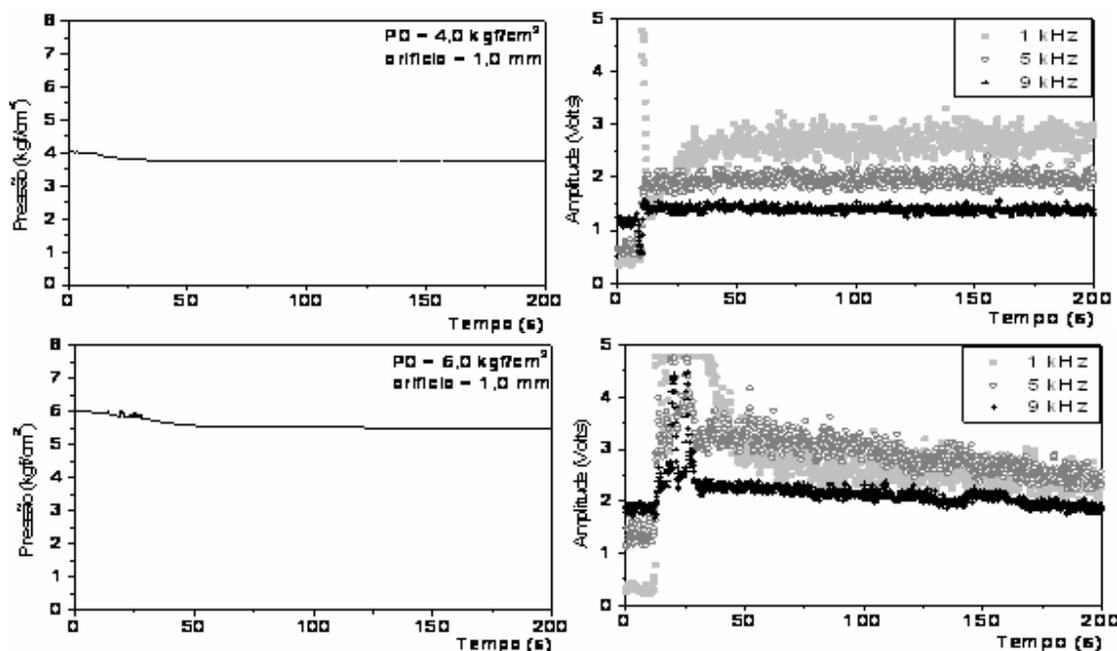


Figura 4.22 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

O ganho foi de 1 no circuito banco de filtros passa faixa e a frequência dominante foi de 1 kHz para os orifícios de 1,5 mm e 2,0 mm (Figuras 4.23 e 4.24).

A diferença na localização do microfone no sistema vaso – tubulação interferiu no comportamento das frequências dominantes. Para as Figuras 4.17 e 4.18 a frequência dominante foi de 5 kHz enquanto que para a Figuras 4.23 e 4.24 a frequência dominante foi de 1 kHz, indicando um som mais grave.

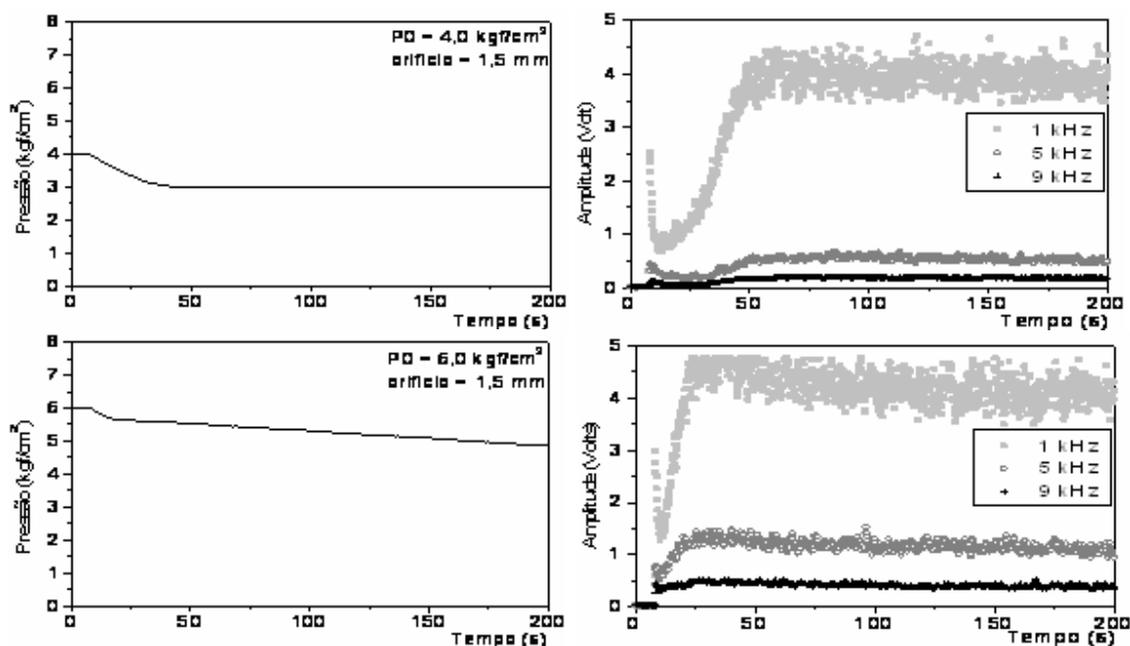


Figura 4.23 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 1,5 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

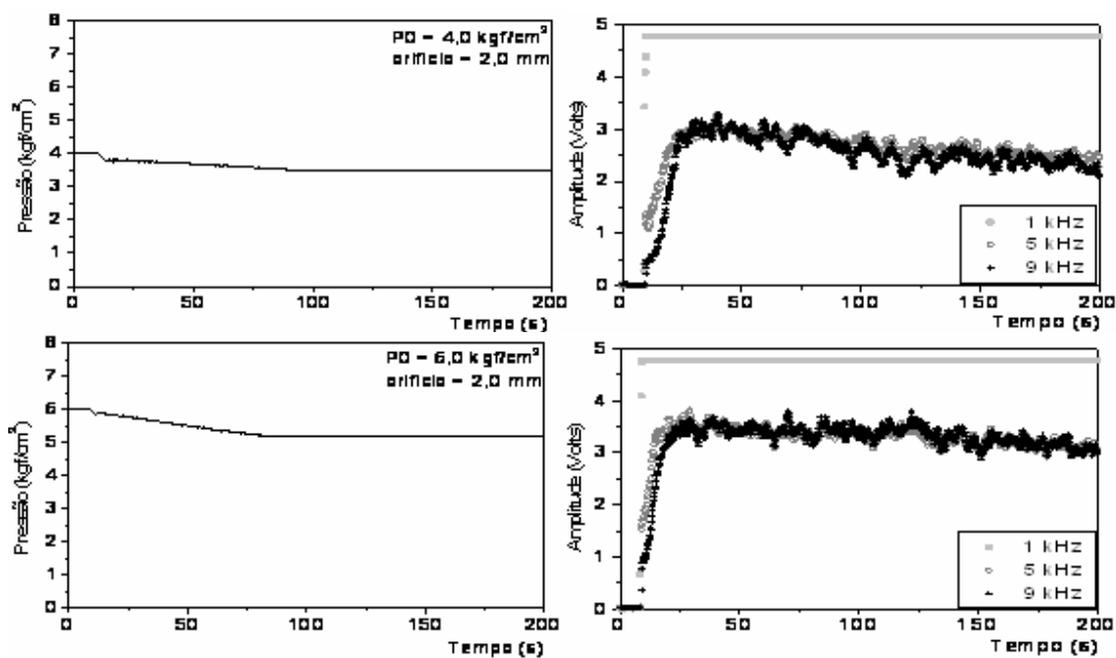


Figura 4.24 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 2,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

Nos experimentos mostrados na Figuras 4.25 a 4.27, correspondentes aos orifícios de 3,0mm, 4,0mm e 5,0mm, utilizou-se ganho de 0,1 no circuito banco de filtros passa faixa para se obter uma leitura adequada das amplitudes em frequência geradas pela ocorrência do vazamento.

As amplitudes aumentaram em função do aumento do orifício. A frequência dominante com os orifícios de 3,0 mm; 4,0 mm e 5,0 mm (Figuras 4.25 a 4.27) também foi de 1 kHz, indicando um som muito mais grave em relação às Figuras 4.19 a 4.21. As frequências de 5 kHz e 9 kHz apresentaram um aumento em amplitude quando a magnitude do orifício foi maior.

As características dos transientes de pressão quando o transdutor de pressão estava localizado na tubulação com alimentação contínua de ar foram as mesmas apresentadas por Macias (2004). Quanto maior a magnitude do vazamento (diâmetro do orifício) maior é a queda de pressão. O aumento da pressão inicial do sistema não influencia no vazamento, a queda de pressão é praticamente constante, pois a descarga de gás para a atmosfera através no vazamento acontece como fluxo “choked” ou sônico, onde o aumento da pressão não induz ao aumento da vazão. O único fator que faz a porcentagem de vazamento variar é o fator de expansão, que é dependente da pressão.

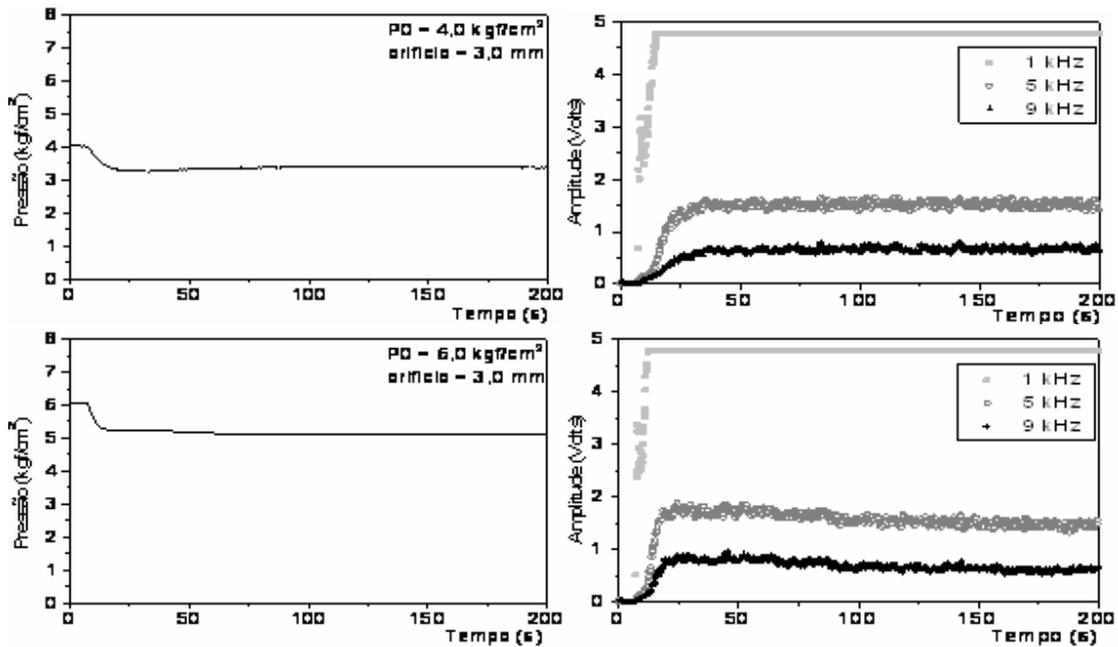


Figura 4.25 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 3,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

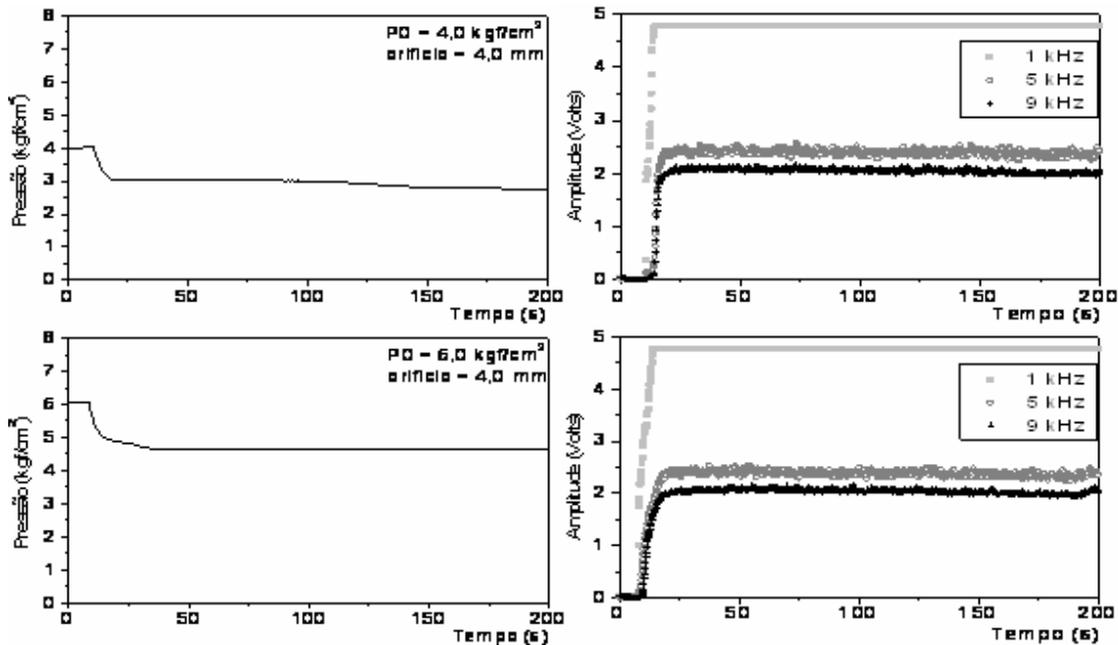


Figura 4.26 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 4,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

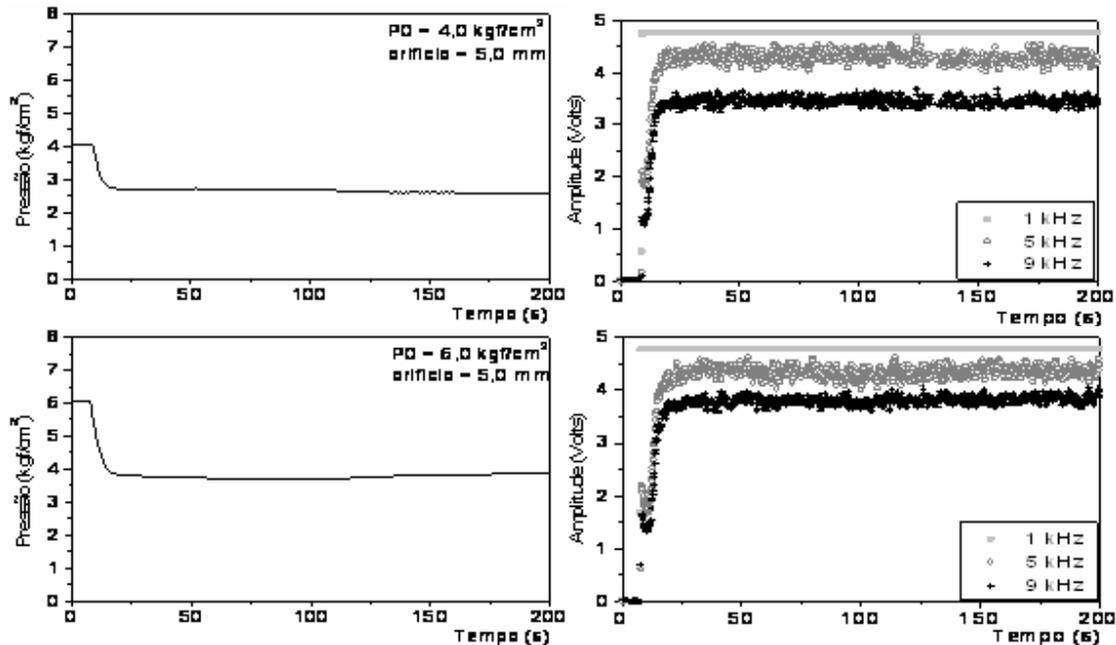


Figura 4.27 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro para orifício de 5,0 mm. Tubulação com alimentação contínua de ar e microfone e transdutor localizado no início da tubulação.

Os resultados obtidos com o sistema vaso – tubulação com alimentação contínua de ar, mostra que os vazamentos são nitidamente detectados através das variações das amplitudes dos ruídos sonoros gerados pelo vazamento para toda a faixa de diâmetro de orifícios utilizada, tanto para o microfone instalado no vaso de pressão quanto à entrada da tubulação.

O mesmo não ocorre com os transientes de pressão. Para orifícios de até 2,0 mm não é nitidamente detectado o vazamento, pois a queda de pressão provocada no sistema pelo vazamento foi muito pequena.

5 . CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nos últimos anos, a detecção de vazamentos em redes de tubulações tem reduzido significativamente o impacto ambiental, já que sua atuação é instantânea, reduzindo o tempo de resposta, comparado ao da intervenção humana.

O presente trabalho constitui em detectar e analisar os transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro causados por vazamentos em uma tubulação operando com ar comprimido sem e com alimentação contínua.

A detecção foi realizada através do transdutor de pressão e do microfone localizados em dois pontos ao longo do sistema, primeiramente localizado no interior do vaso de pressão e posteriormente à entrada da tubulação e em ambos os casos os experimentos foram submetidos a várias condições de operação.

Os equipamentos utilizados para a detecção de vazamento foi o transdutor de pressão e o microfone que estavam acoplados a um computador PC através de uma placa conversora ADA. A pressão interna do sistema variou de 2 a 7 kgf/cm², o diâmetro do orifício (magnitude do vazamento) variou de 0,4 a 5,0 mm.

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

5.1 Conclusões

As características do perfil dos transientes de pressão e das amplitudes do ruído sonoro para a detecção de vazamento em tubulação fechada são as mesmas encontradas para a detecção de vazamento em tubulação com escoamento contínuo de ar.

Na primeira fase foi concluído que existiu uma proporcionalidade entre a pressão inicial interna e o tempo necessário para esvaziar o sistema vaso - tubulação após a abertura da válvula de vazamento.

Foi comprovado também que, no instante em que o vazamento foi provocado, o ruído sonoro variou com o aumento do diâmetro do orifício. Para vazamentos provocados por diâmetros de orifícios menores tem-se um som mais agudo se comparados com orifícios de diâmetros maiores que apresentaram som predominantemente grave. O menor orifício em que foi possível detectar o vazamento foi o de 0,4 mm de magnitude.

A mudança na posição do transiente de pressão e do microfone alterou individualmente as frequências presentes no ruído sonoro, indicando uma mudança na frequência dominante e conseqüentemente uma mudança de som.

Na segunda fase, foi possível observar que para diâmetros de orifícios maiores houve uma queda de pressão mais brusca no instante em que o vazamento foi provocado comparado com diâmetros de orifícios menores.

As frequências presentes no ruído sonoro provocadas pelo vazamento também foram alteradas a partir da mudança dos diâmetros de orifício e da pressão inicial interna do sistema. Para orifícios de maior grandeza houve um aumento individual e/ou em conjunto das frequências em relação aos orifícios de menor grandeza. O menor orifício em que foi possível detectar o vazamento foi o de 1,0 mm de magnitude.

A mudança na posição do transiente de pressão e do microfone também apresentou uma mudança na frequência dominante, para o transdutor de pressão e o microfone localizados à entrada da tubulação a frequência dominante para todas as magnitudes de vazamento foi de 1 kHz, indicando que quanto mais próximo o microfone estiver do vazamento o som é mais grave.

Para os experimentos realizados em laboratório através do método acústico e da análise de transiente de pressão, o método acústico apresentou uma melhor eficiência na detecção do vazamento em relação ao método da análise do transiente de pressão. Para toda faixa de diâmetro de orifícios utilizada as variações das amplitudes dos ruídos sonoros gerados pelo vazamento foram nitidamente detectadas enquanto que os transientes de pressão não apresentaram variações que comprovem o vazamento para orifícios menores que 2,0 mm.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Para trabalhos a serem realizados usando a técnica de detecção de vazamentos pela análise de transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro sugere-se:

- O desenvolvimento supervisorio para atuar logo após a ocorrência do vazamento;
- O desenvolvimento de uma técnica para localizar os vazamentos em tubulações transportando gás
- Aplicar a técnica de detecção de vazamentos em campos de redes de tubulação utilizando o transdutor de pressão e o microfone para compará-las com os experimentos realizados em laboratório.

6 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparecido, J. B. *Curso de Especialização em Tecnologia do Gás Natural. Mecânica dos Fluidos Compressíveis*. Campo Grande, 2005.
- Baghdadi, A.H.A., Mansy, H.A. *A mathematical model for leak location in pipelines*. Applied Mathematical Modelling, vol.12, n.2, 1988.
- BeggS, H. D. *Gas Production Operations*. 3 ed. OGCI Publications, USA, 1991.
- 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.
- Billmann, L., Isermann, R. *Leak detection methods for pipelines*. Automatica, v.23, n.3, p. 381-385, 1987.
- Black, P. *A review of pipeline leak detection technology*. Pipeline System, v.7, Fluid Mechanics and its Applications, Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.p. 287-298, 1992.
- Braga, C. F. *Detecção de vazamentos por computador “on-line” em tubulações transportando misturas gás-líquido*. Universidade Estadual de Campinas, 2001, Tese (mestrado).
- Buiatti, C. M. *Monitoramento de tubulações por técnicas computacionais on-line*. Universidade Estadual de Campinas, 1995, Tese (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 (mestrado).
- Chaudry, M. H. *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Company, Litton Educational Publishing, p. 1-73, 1979.

- 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.
- Churchill, S. W. *Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes*. Chemical Engineering, v. 84, n. 24, p. 91-92, nov.7, 1977.
- Cist, D. B., Schutz, A.E. *State of the art for pipe & leak detection*. Geophysical Survey Systems, Inc., N. Salem, USA, Nov 2001.
- Delmée, G. J. *Manual de medição de vazão*. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1982.
- Dempsey, J., Al-Habib, R. *SCADA computer system controls major Saudi Aramco crude oil pipeline*. 5th World Congress on Chemical Engineering, v. 1, p. 973-980, San Diego, California, USA, 1996.
- Fox, R.W., McDonald, A.T. *Introdução à mecânica dos fluidos*. Quarta edição, LTC Editora, 1997.
- Fukushima, K., Maeshima, R., Kinoshita, A., Shiraishi, H., Koshijima, I. *Gas pipeline leak detection system using the online simulation method*. Computers and Chemical Engineering, v. 24, n.2-7, p.453-456, 2000. Gas Engineer's Handbook.
- Hayashi, K., Shinohara, Y., Watanabe, K. *Acoustic Detection Of In-Sodium Water Leaks Using Twice Squaring Method*. Japan Atomic Energy Research Institute, Japan, 1995.
- Hunaidi, O., Chu, W. T. *Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes*. Applied Acoustics, v. 58, p.235-254, 1999.
- Jönsson, L., Larson, M. *Leak detection through hydraulic transient analysis*. Pipeline System, v. 7, Fluid Mechanics and its Applications, p. 273-286, Dordrecht. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- Ke, S.L., Ti, H.C. *Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network*. Chemical Engineering Journal, v. 76, p. 169-177, 2000.
- Kennedy, J. L. *Oil and Gas pipeline fundamentals*, 2.ed., PennWell Publishing Company, Tulsa, USA, 1993, 366 p.

- Ludwig, E.E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical plants*, v.1, Third Edition, Gulf Publishing Company , USA, 1995, Cap 1 e 2.
- Matko, D., Geiger, G., Gregoritz, W. *Pipeline simulation techniques*. Mathematics and Computer in Simulation, v.52, p. 211-230, 2000.
- Muggleton, J.M., Brennan, M.J. *Leak noise propagation and attenuation in submerged plastic water pipes*. Institute of Sound and Vibration Research, Southampton University, Highfield, Southampton SO17 1BJ, UK, 2003.
- Naves, G. J. *Técnicas de computação em tempo real em controle e supervisão de tubulações*. Universidade Estadual de Campinas, 1991, Tese (mestrado).
- Oosthuizen, P. H., Carscallen, W. E. *Compressible Fluid Flow*, McGraw-Hill, USA, 1997. Cap. 3 e 9.
- Osiadacz, A. J. *Simulation and Analysis of gas networks*, E&F.N. Spon Ltd, London, 1987, Cap. 4 e 7.
- Perry's *Chemical Engineers' Handbook*, Seventh Edition, McGraw-Hill, Australia, p. 2-140 e Cap.6, 1998.
- Perry. *Manual de Engenharia Química*, Quinta Edição, Ed.Guanabara, Rio de Janeiro, 1980, Cap 5.
- Pudar, R. S., Liggett, J. A. *Leaks in pipe networks*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 118, n. 7, p.1031-1046, 1992.
- Sandberg, C., Holmes, J., McCoy, K., E Koppitsch, H. *The application of a continuous leak detection system to pipelines and associated equipment*. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 25, n. 5, p. 906-909, 1989.
- Shimanskiy, S., Iijima, T., Naoi, Y. *Development Of Microphone Leak Detection Technology on Fugen Npp*. Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC), Fugen Nuclear Power Plant 3, Japan, 2003.
- Silva, R. A. *Supervisão de tubulações por computador on-line*. Universidade Estadual de Campinas, 1996, Tese (mestrado).

- Souza, A. L. *Detecção de vazamentos em tubulações através da Análise Espectral*. Universidade Estadual de Campinas, 2002, Tese (doutorado).
- Streeter, V. L., Wylie, G. B. *Fluid Mechanics*, Mc Graw-Hill, 1975. Cap. 5 p. 291-297, Cap. 12 p. 647-667.
- Verde, C. *Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines*. Control Engineering Practice, v. 9, p. 673-682, 2001.
- Watanabe, K., Himmelblau, D. M. *Detection and location of a leak in a gastransport 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.
- Wylen, V. John, G. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. Segunda edição. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1976.
- Zhang, J. *Statistical pipeline leak detection for all operating conditions*. Pipeline & Gas Journal Online, Fev 2001.

6.1 – Referências da Rede de Internet

- Access Science, The online Encyclopedia of Science & Technology, McGraw-Hill, www.AccessScience.com
- Gás e Energia, <http://www.gasenergia.com.br/>
- GasNet, <http://www.gasnet.com.br>
- Gaspetro, Petrobrás, <http://www.gaspetro.com.br/gas.htm>
- Rede Gás e Energia, <http://www.redegasenergia.com.br/>

APÊNDICE A – TRANSIENTES DE PRESSÃO E AMPLITUDE DO RUÍDO SONORO CAUSADOS POR DIVERSOS TIPOS DE VAZAMENTOS EM UMA TUBULAÇÃO SEM ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA DE AR.

Neste apêndice são apresentados os transientes de pressão e as variações em amplitude do ruído sonoro em uma tubulação com 60 metros de comprimento ligado a um vaso de pressão simulada experimentalmente sem alimentação contínua de ar para várias condições de operação.

Os ensaios foram realizados utilizando diferentes pressões iniciais, diferentes diâmetros de orifícios e diferentes localizações do transdutor de pressão e do microfone. A tubulação foi mantida com a válvula de alimentação fechada e o tempo do experimento foi o suficiente para que a tubulação se esvaziasse por completo após a abertura da válvula utilizada para provocar o vazamento.

Para a simulação de transientes de pressão e variações em amplitude do ruído sonoro foram utilizados os seguintes parâmetros:

➤ *Vaso de pressão:*

Material: botijão de gás

Armazenagem: $V_i = 34,5$ l de ar comprimido

Capacidade de pressão interna: $P_i = 19$ kgf/cm²

➤ *Tubulação:*

Material: ferro galvanizado

Comprimento: $L = 60$ m. Foram utilizadas 10 tubulações com 6 m cada uma.

Comprimento equivalente: $L_{eq} = 68,5$ m. Foram utilizados 18 cotovelos para unir os pedaços de 6 m que formam a tubulação; cada um com um comprimento equivalente a 0,474 m. Assim os 18 cotovelos correspondem a 8,5 m de comprimento.

➤ *Fluído:*

Gás escoando na tubulação: ar

Temperatura ambiente: $T = 25^{\circ}\text{C}$

➤ *Variáveis: condições de operação*

Pressão inicial: P_0 (kgf/cm^2)

Amplitude: A (Volts)

x = posição do vazamento

y = posição do transdutor de pressão e do microfone

A.1 Transdutor de pressão e microfone instalados no vaso de pressão.

Os resultados dos experimentos com o transdutor de pressão e microfone localizados no vaso de pressão são mostrados nos gráficos a seguir, onde é possível observar o perfil do transiente de pressão e as variações em amplitude do ruído sonoro provocados pelo vazamento. Os orifícios utilizados para simular o diâmetro dos vazamentos foram: 0,4 mm, 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm, 2,5 mm, 3,0 mm, 4,0 mm e 5,0 mm, e as pressões iniciais utilizadas foram de 2,0 a 7,0 kgf/cm^2 .

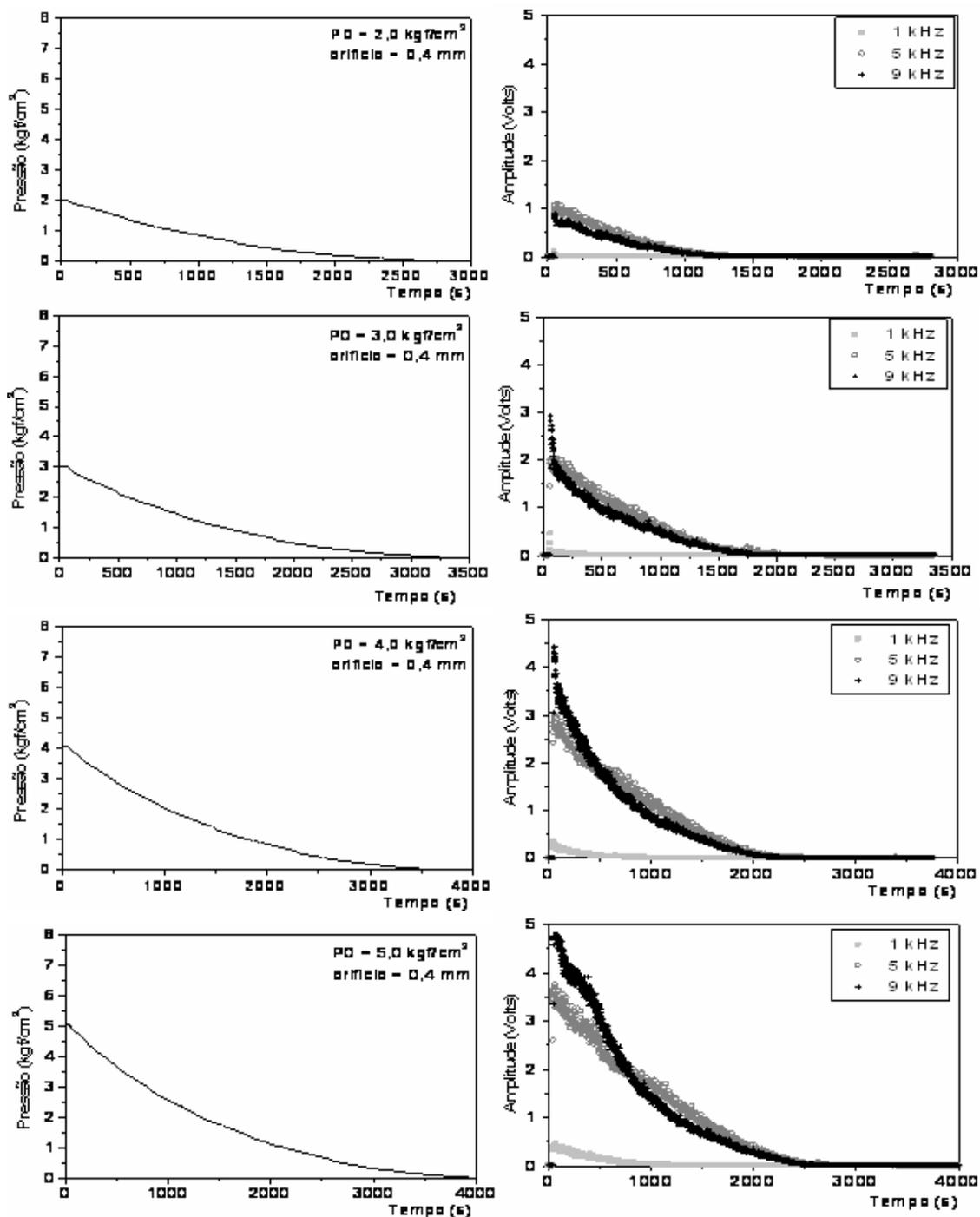


Figura A.1 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 0,4 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 8.

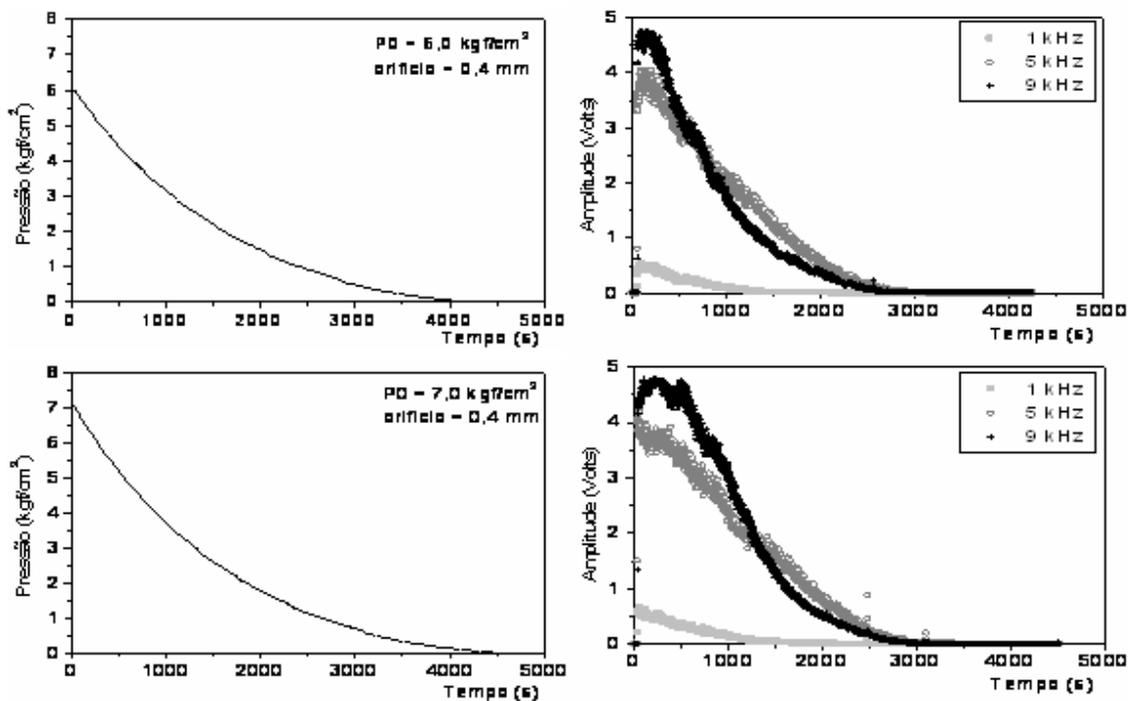


Figura A.2 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 0,4 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 8.

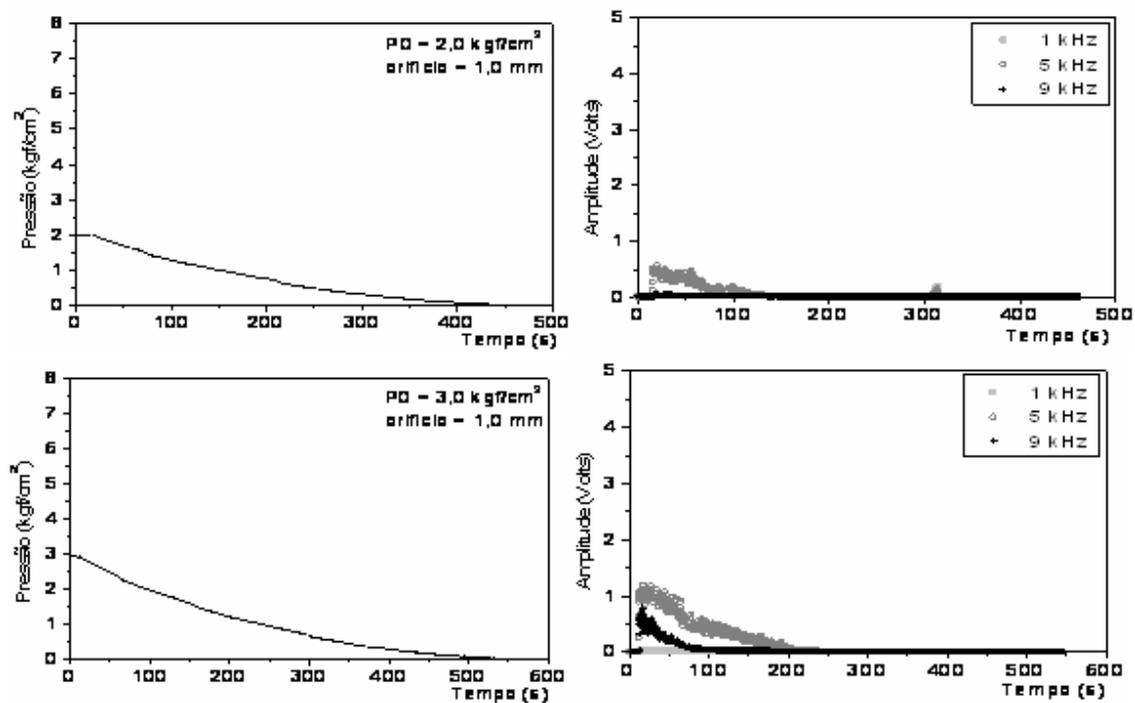


Figura A.3 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 1,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 2.

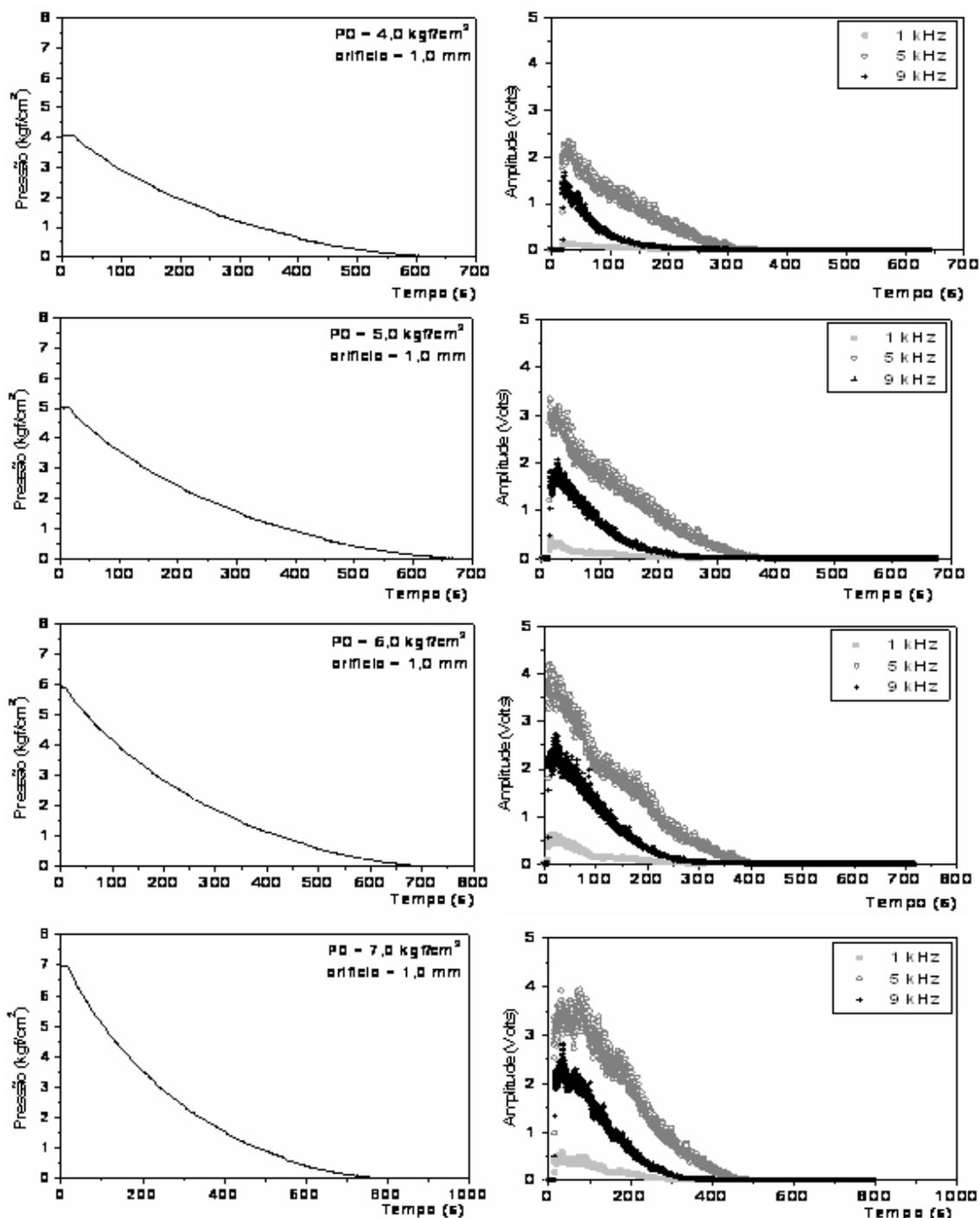


Figura A.4 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 1,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 2.

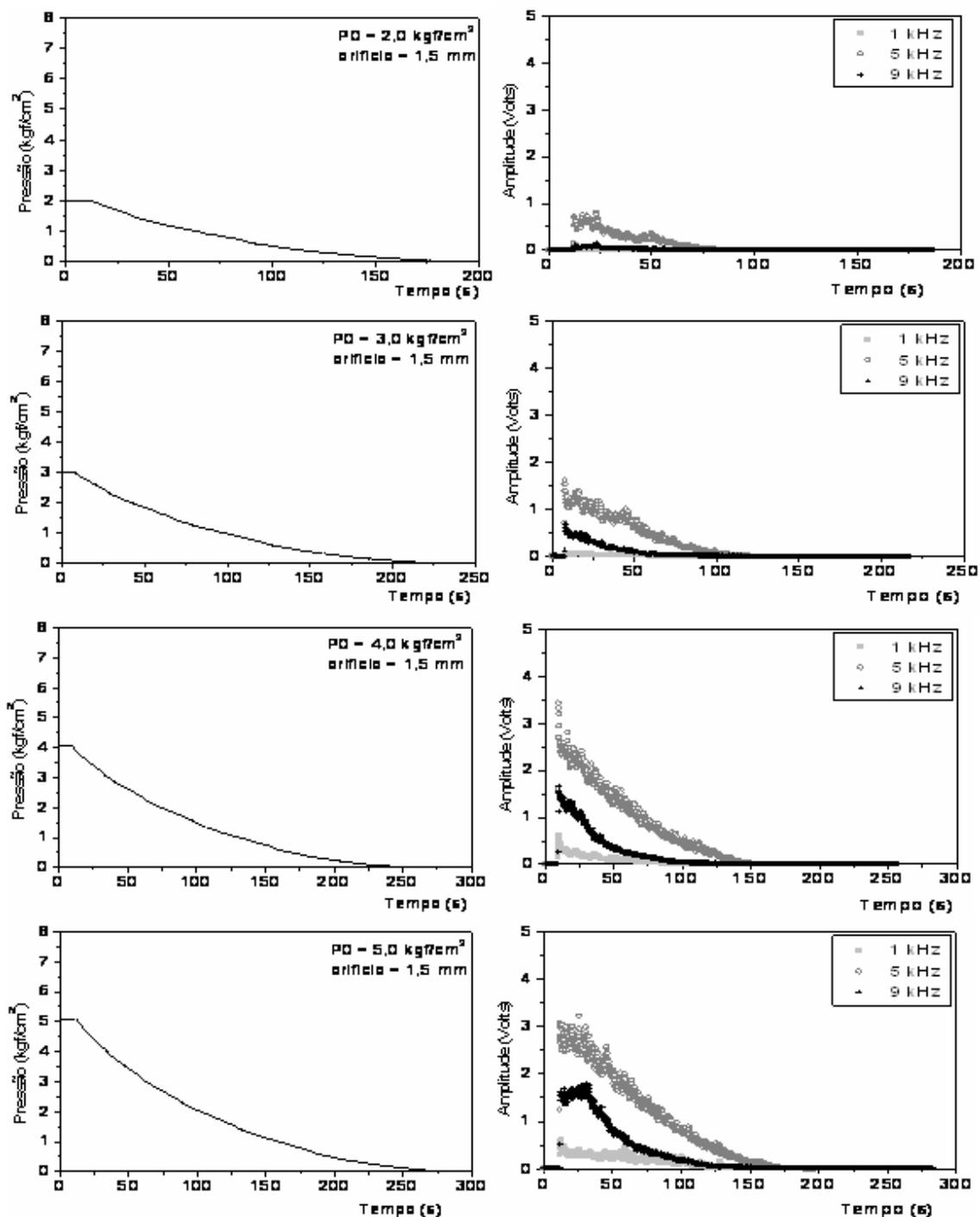


Figura A.5 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 1,5 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

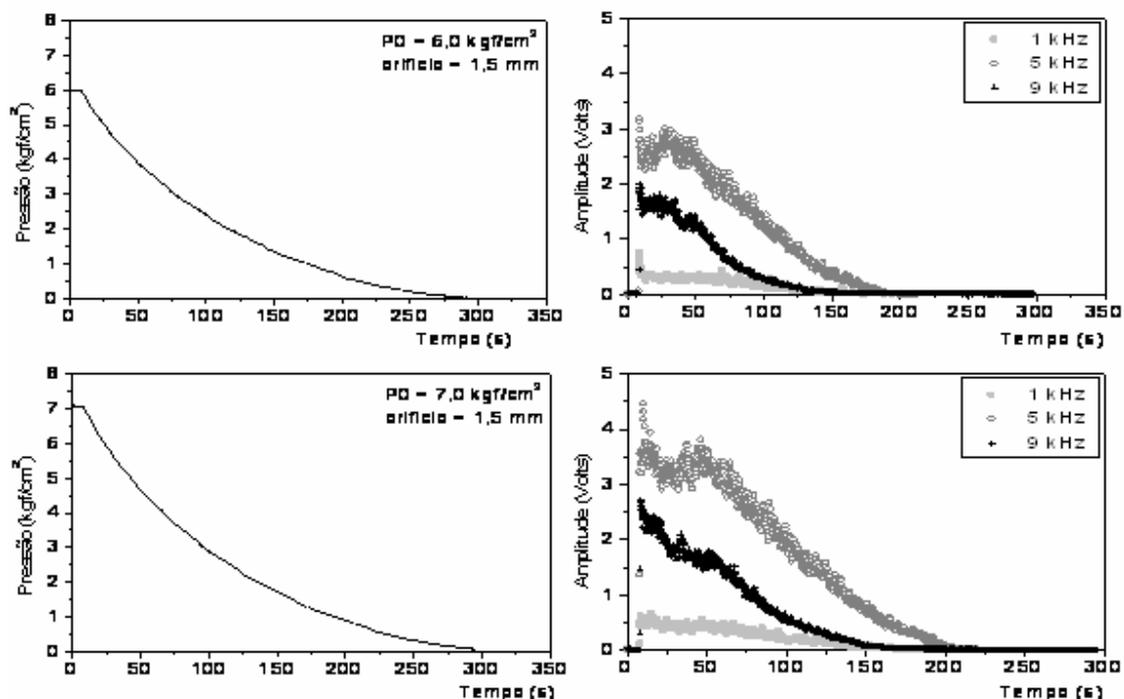


Figura A.6 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 1,5 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

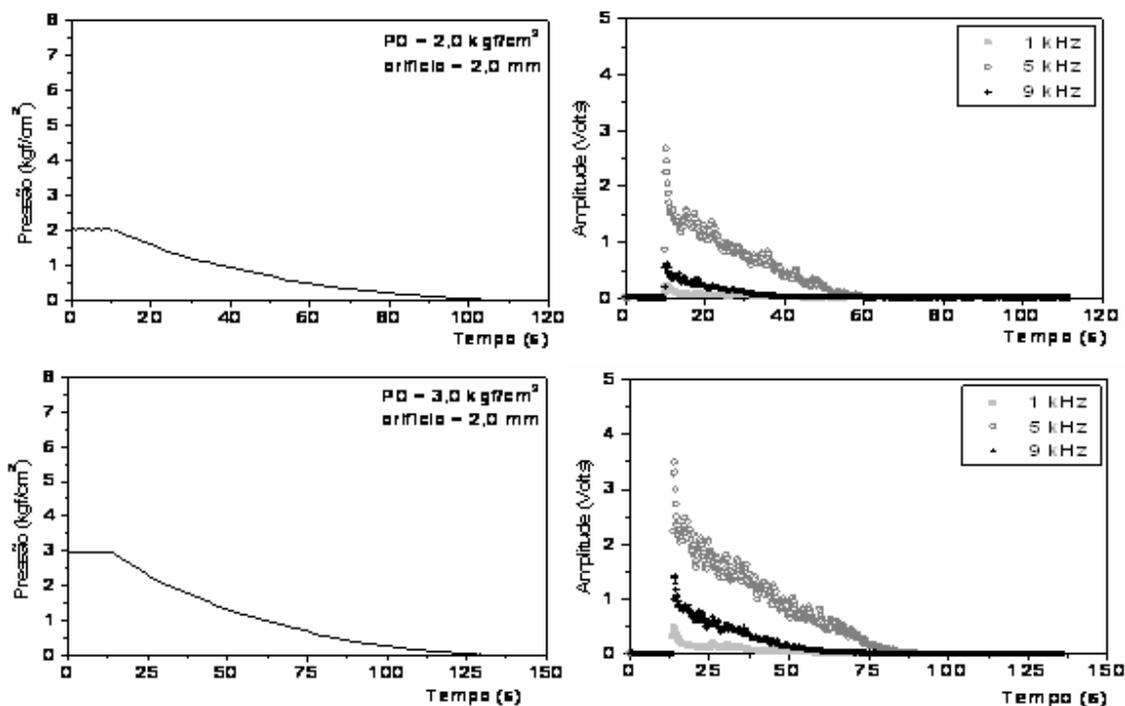


Figura A.7 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 2,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

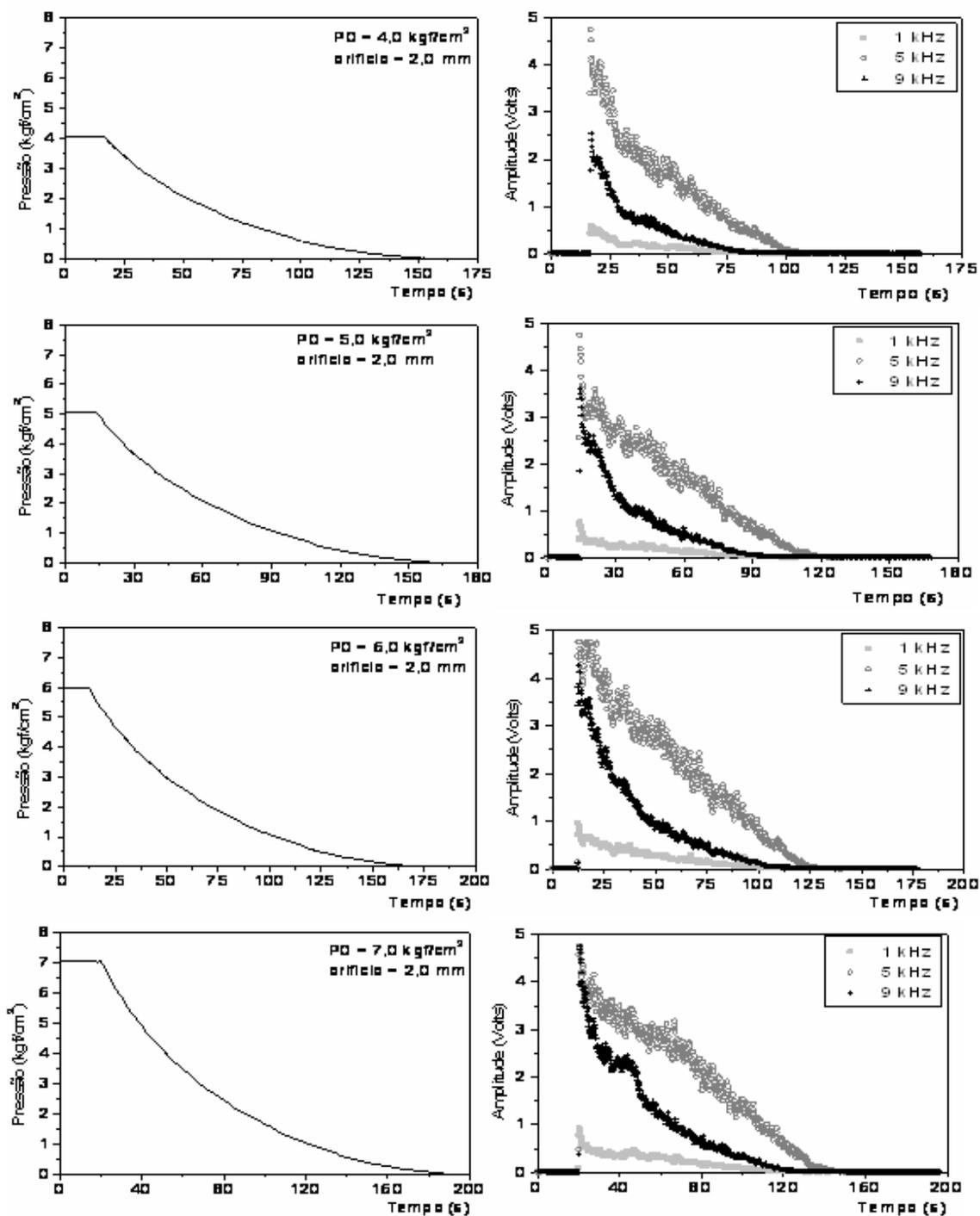


Figura A.8 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 2,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

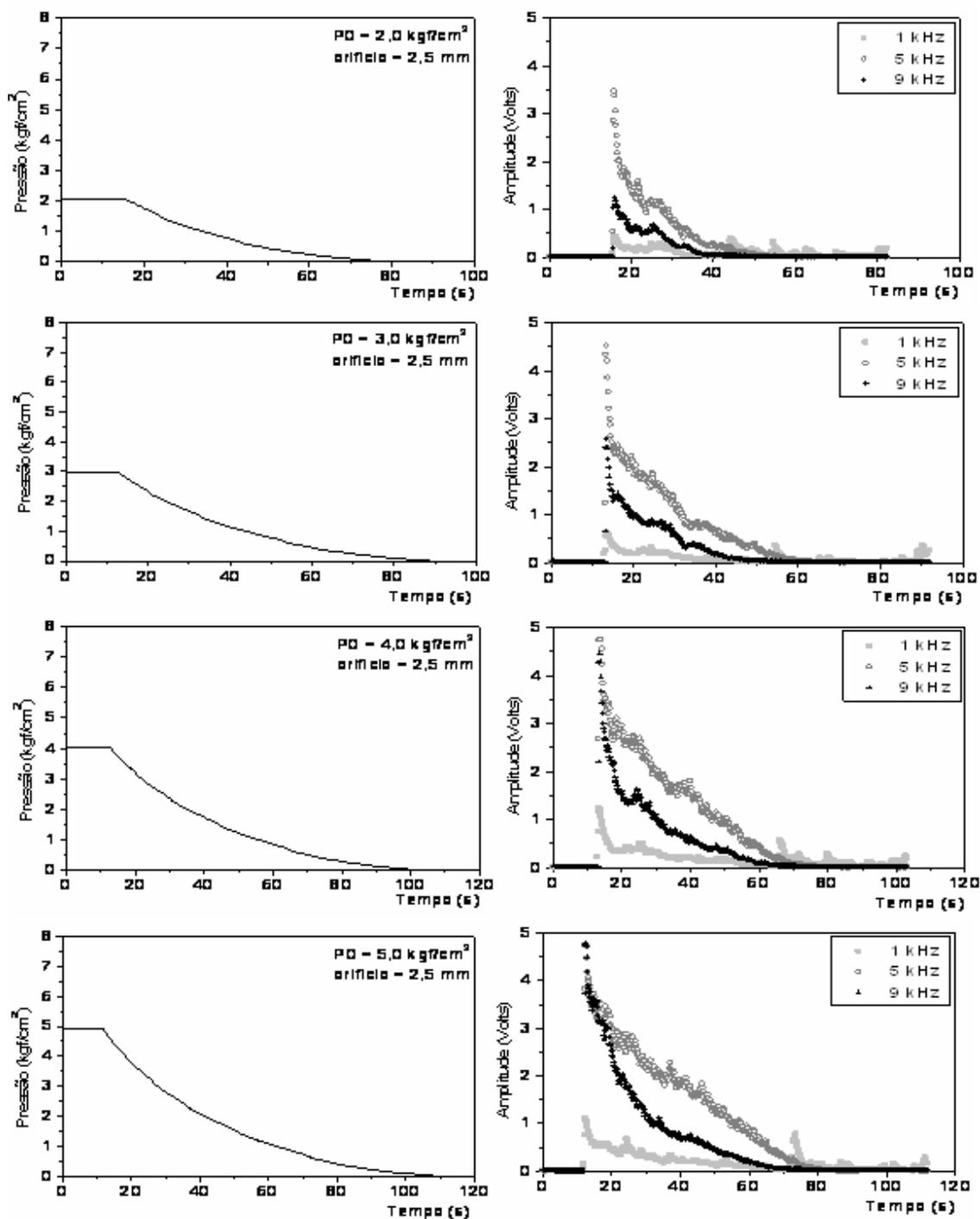


Figura A.9 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 2,5 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

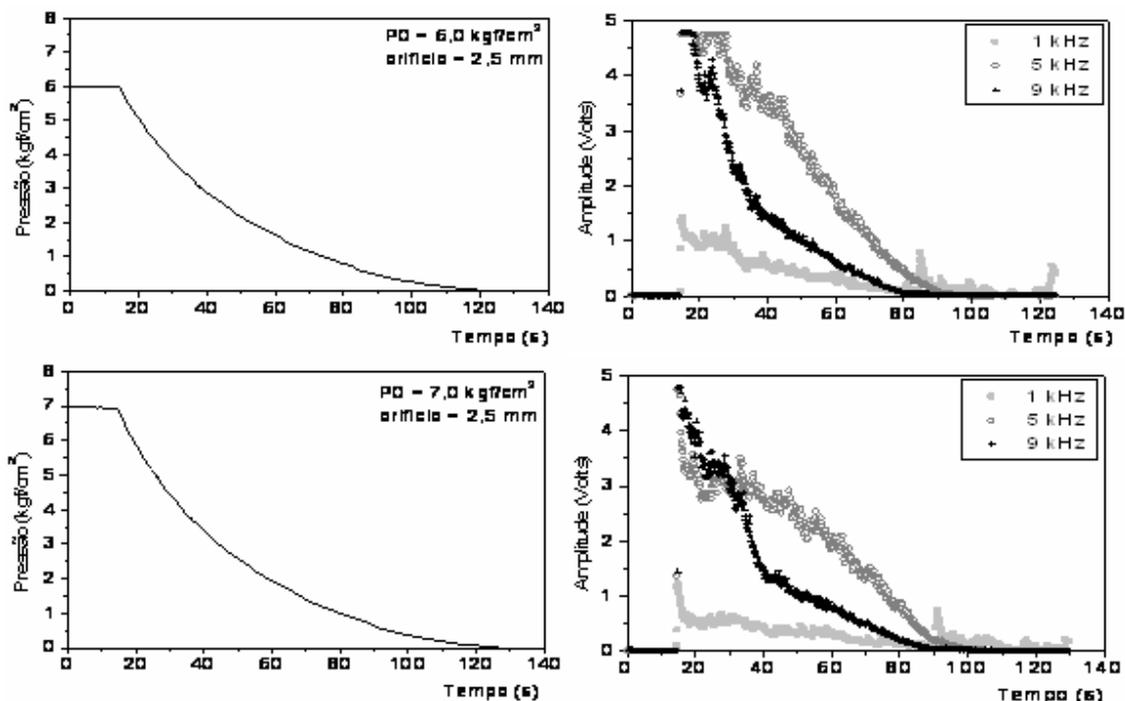


Figura A.10 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 2,5 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

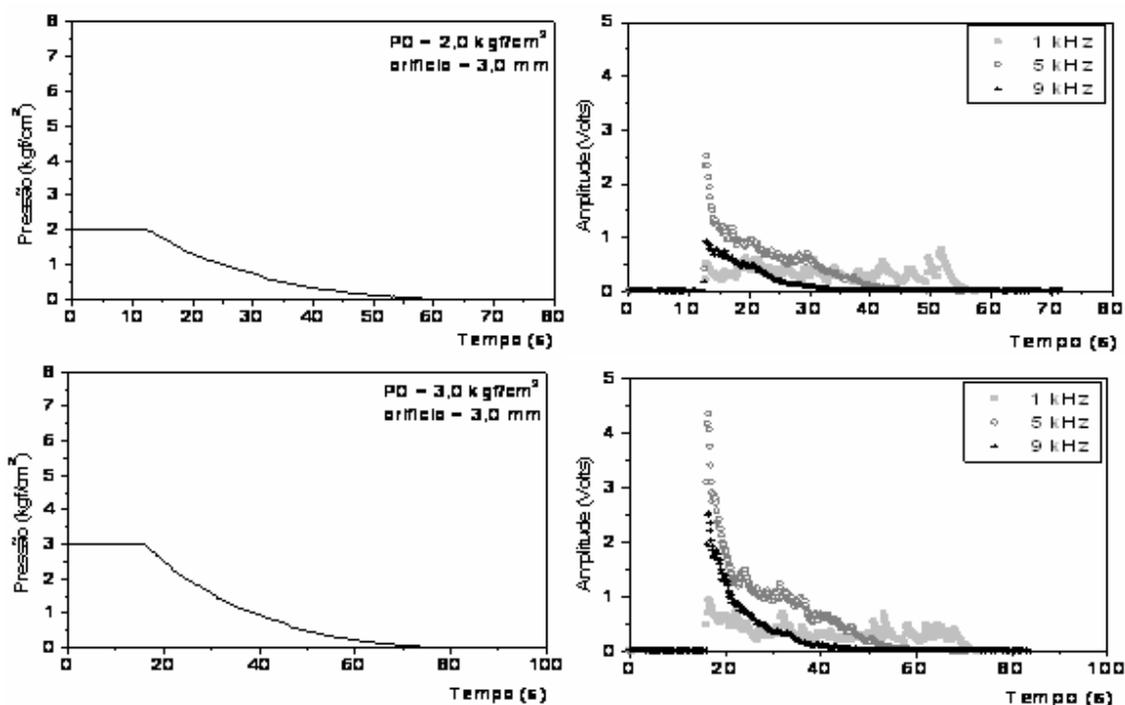


Figura A.11 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 3,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

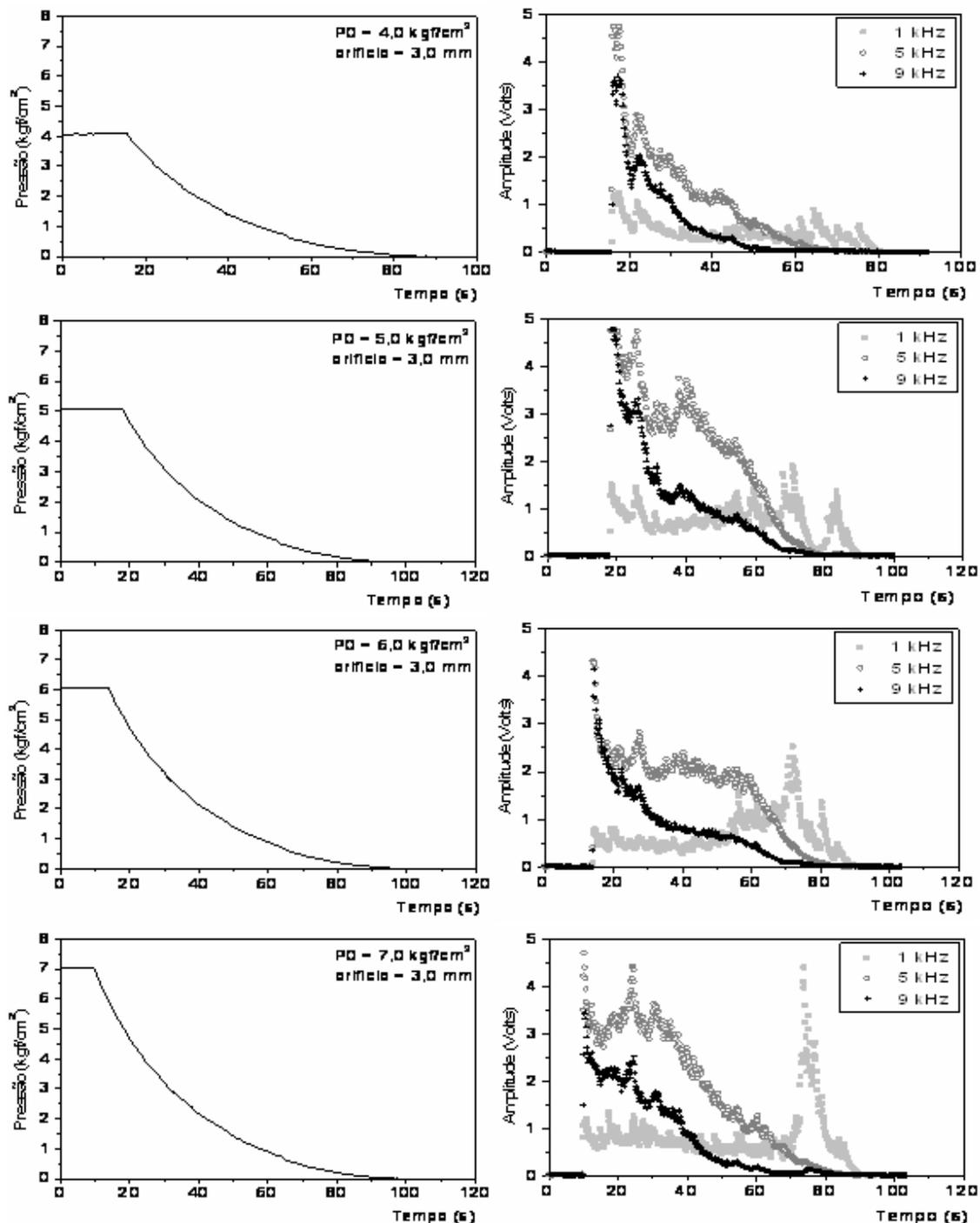


Figura A.12 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 3,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

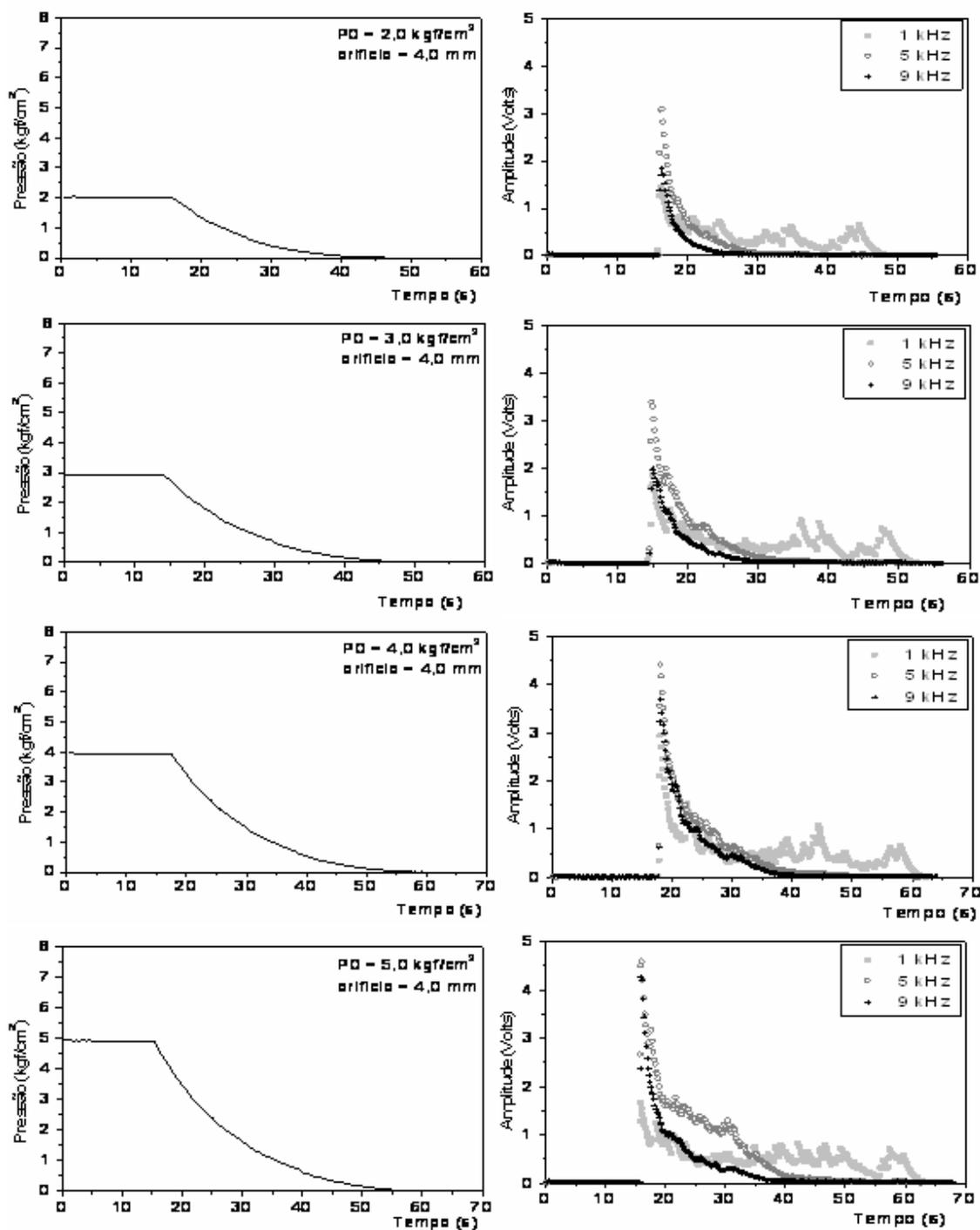


Figura A.13 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 4,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

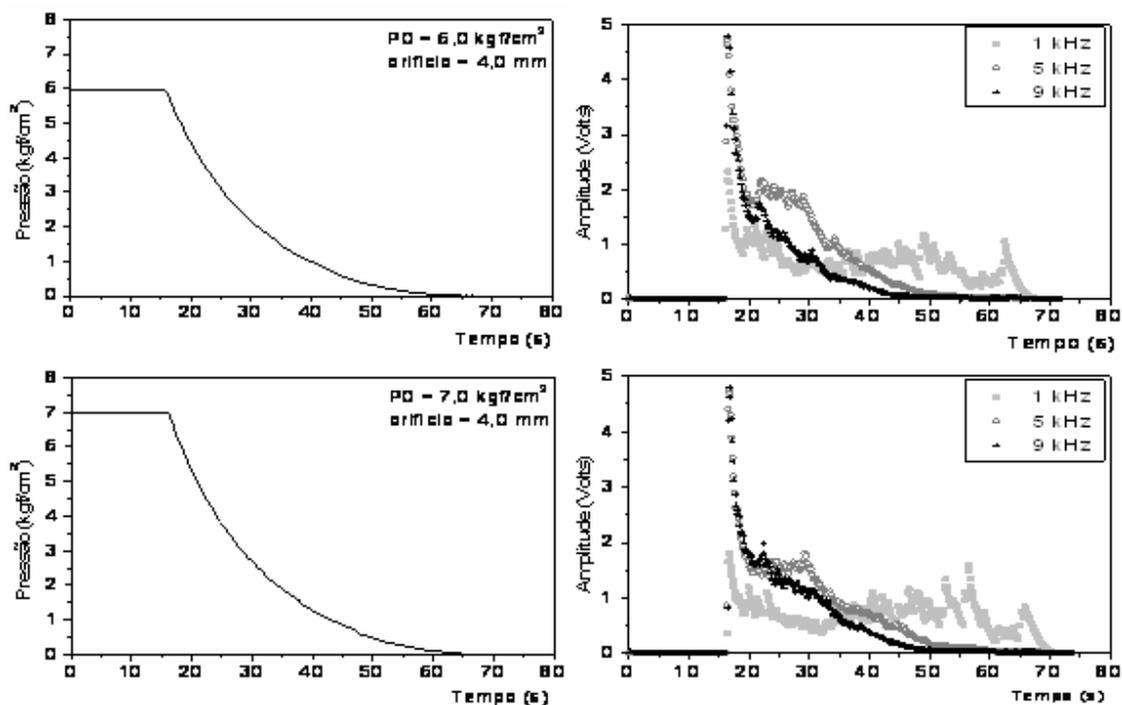


Figura A.14 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 4,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

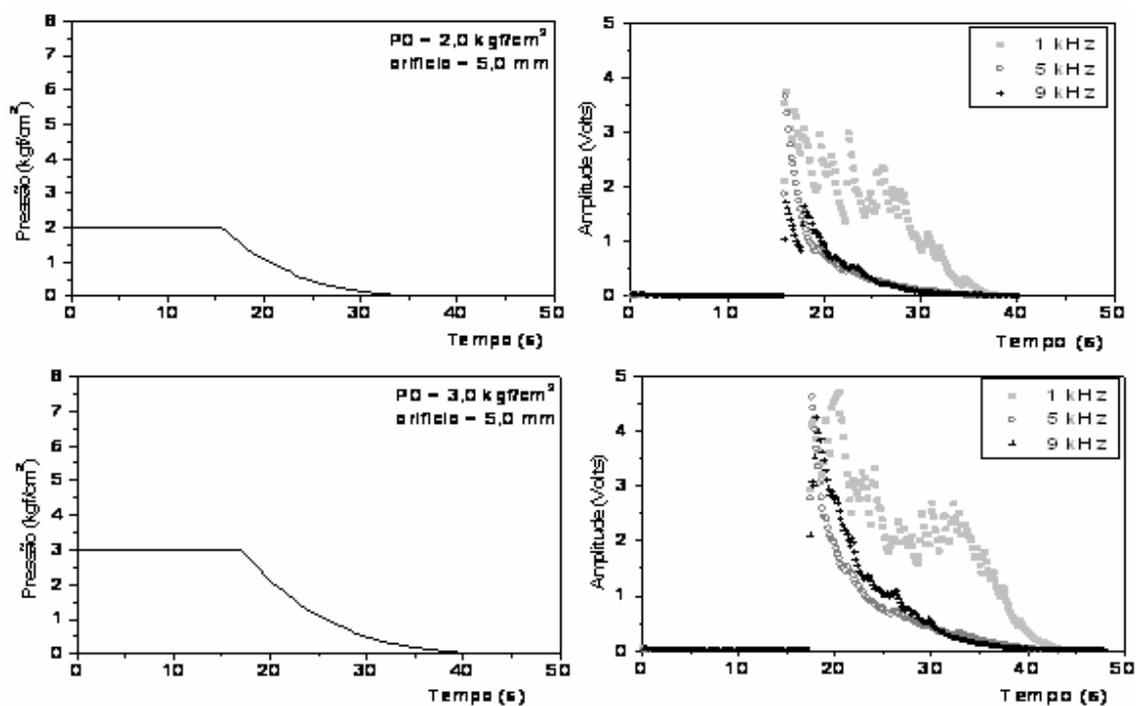


Figura A.15 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 5,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

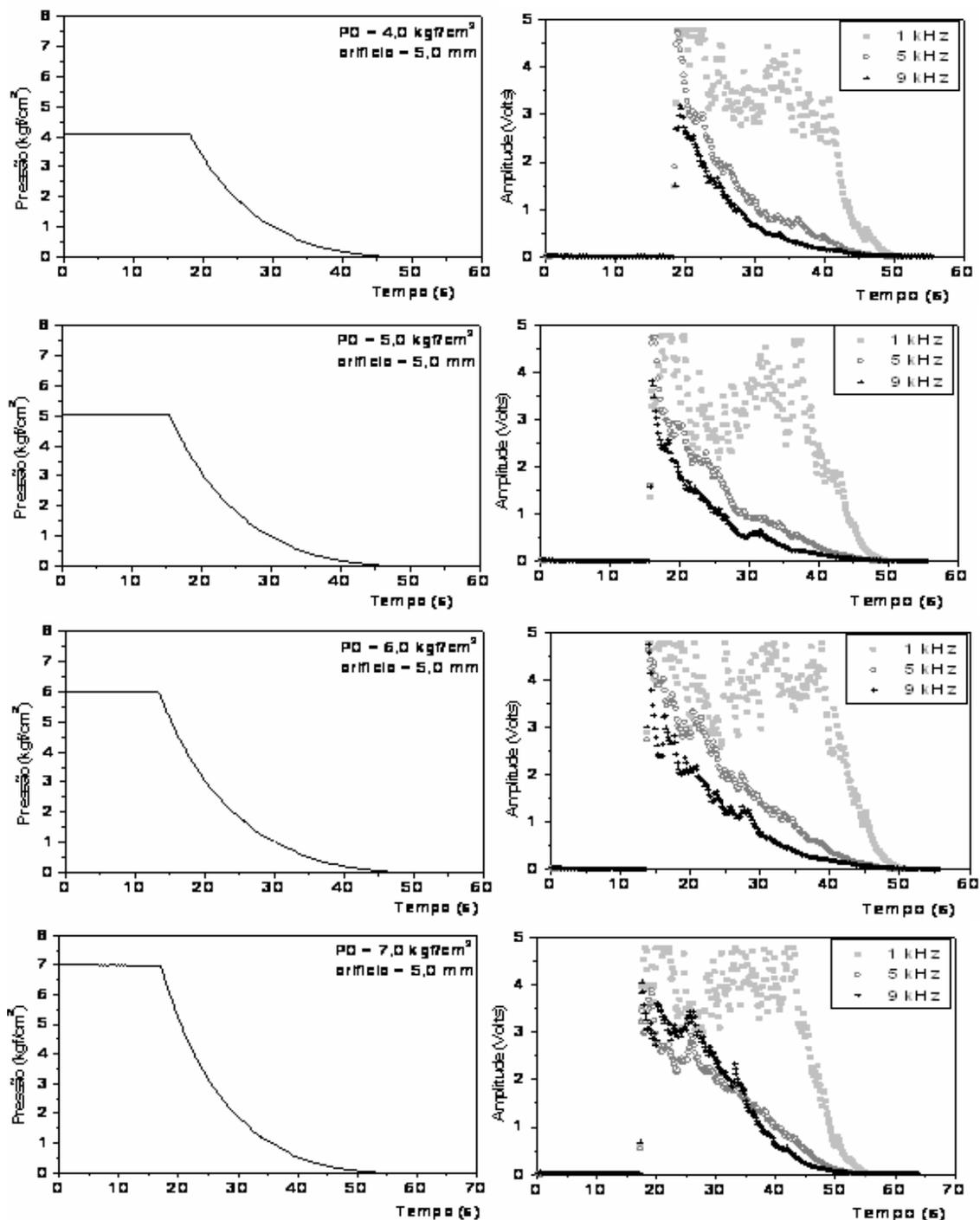


Figura A.16 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 5,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

A.2 Transdutor de pressão e microfone instalados à entrada da tubulação.

Os resultados dos experimentos com o transdutor de pressão e microfones localizados no início da tubulação são mostrados nos gráficos a seguir, onde é possível observar o perfil do transiente de pressão e as variações em amplitude do ruído sonoro provocados pelo vazamento. Os orifícios utilizados para simular o diâmetro dos vazamentos foram: 0,8 mm, 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm, 2,5 mm, 3,0 mm, 4,0 mm e 5,0 mm, e as pressões iniciais utilizadas foram de 2,0 a 7,0 kgf/cm².

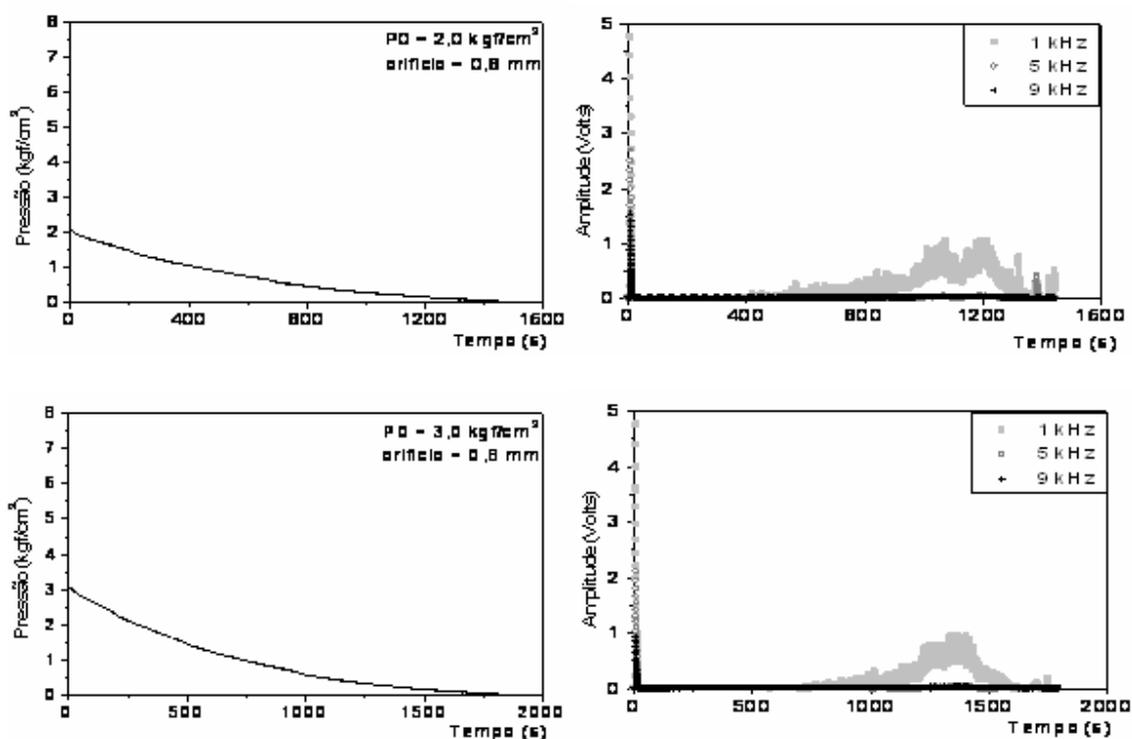


Figura A.17 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 0,8 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 8.

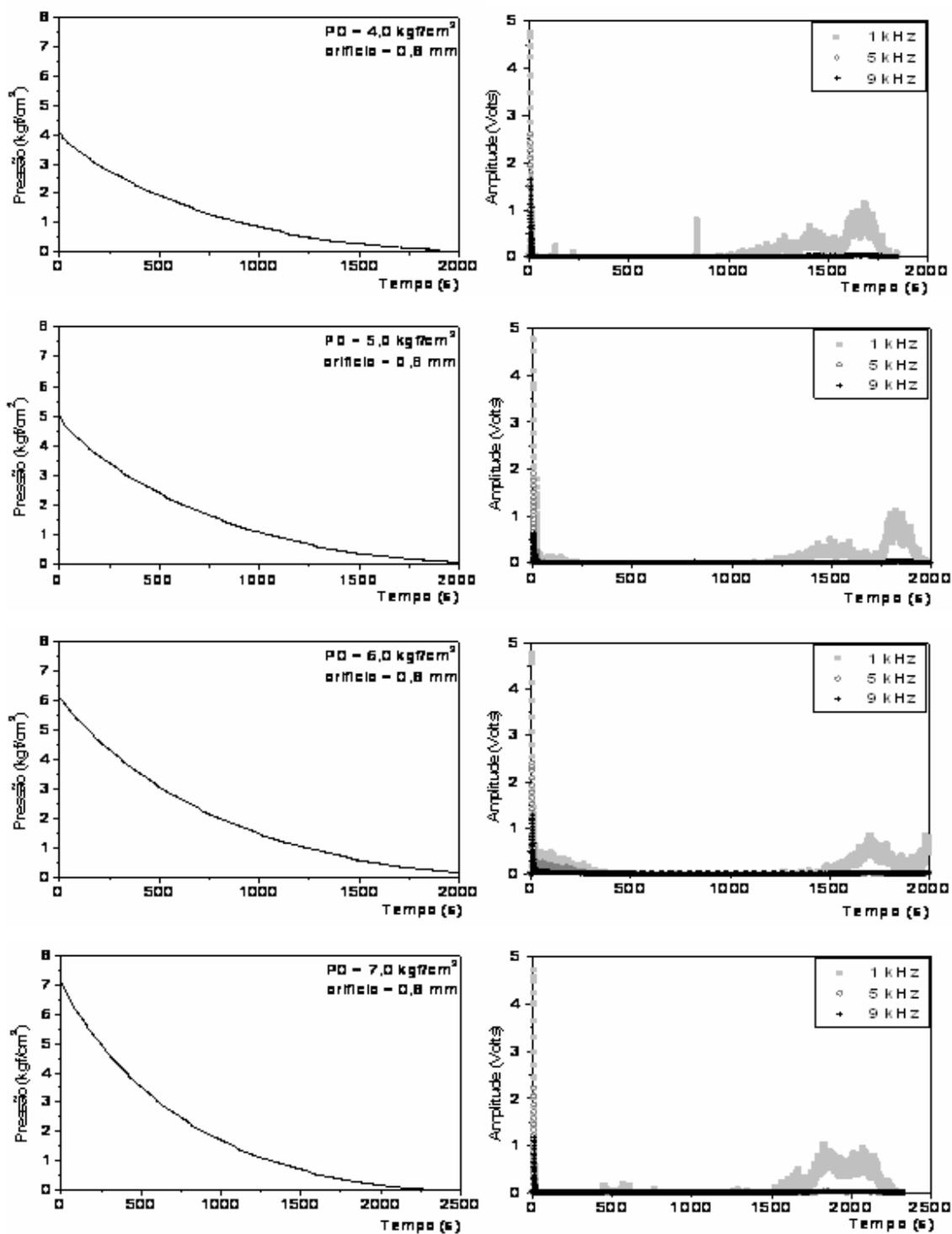


Figura A.18 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 0,8 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 8.

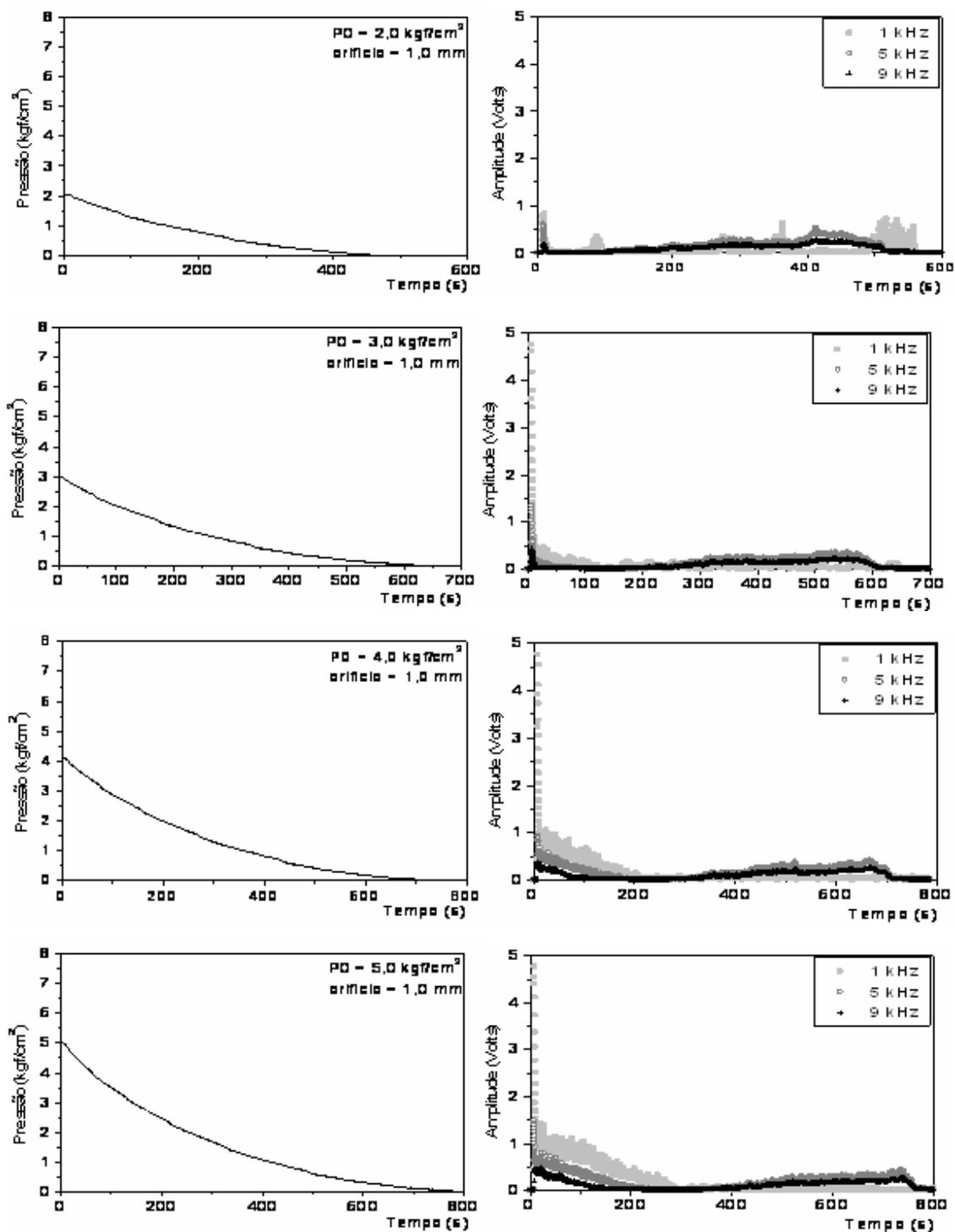


Figura A.19 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 1,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 4.

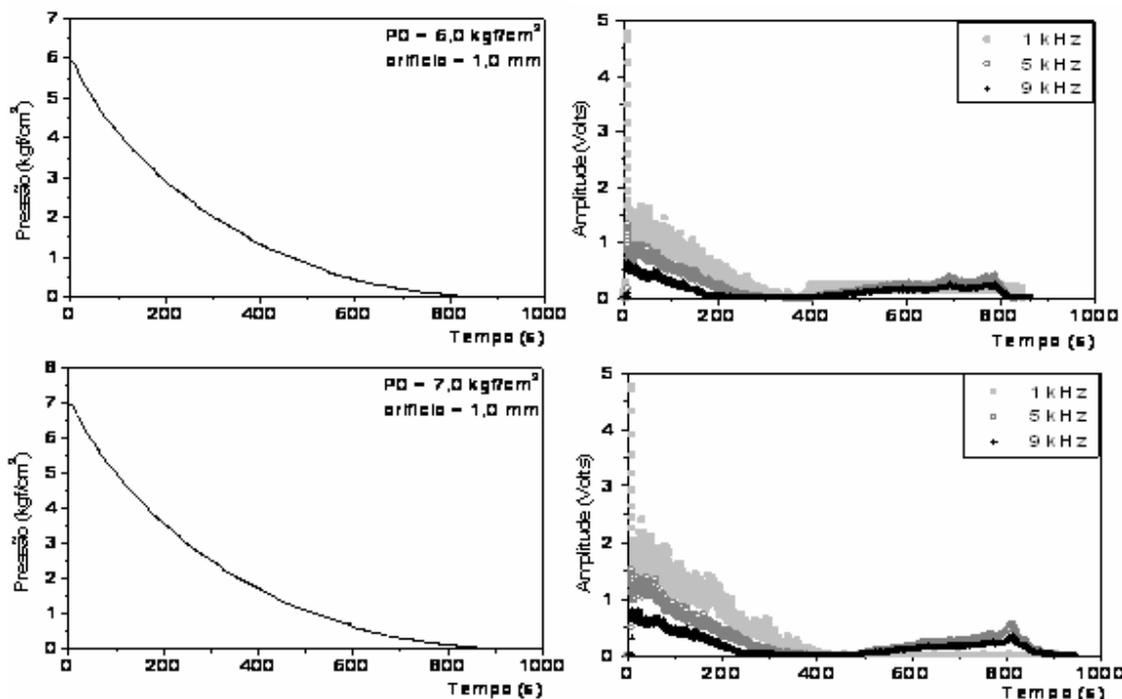


Figura A.20 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 1,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 4.

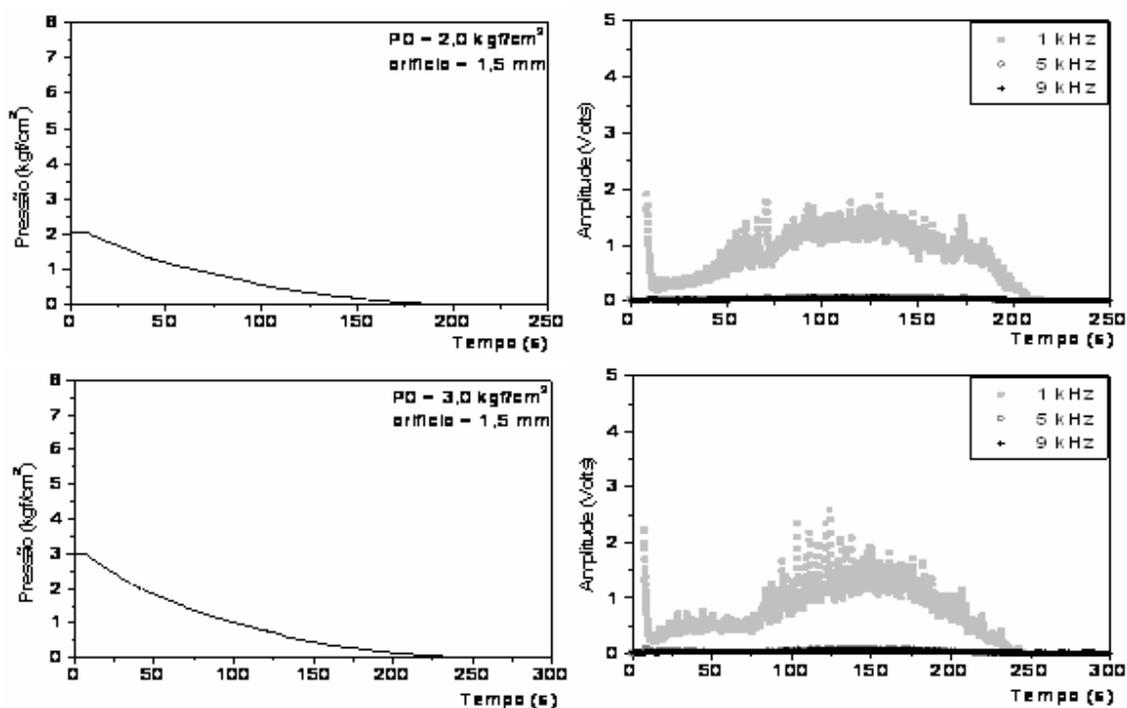


Figura A.21 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 1,5 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

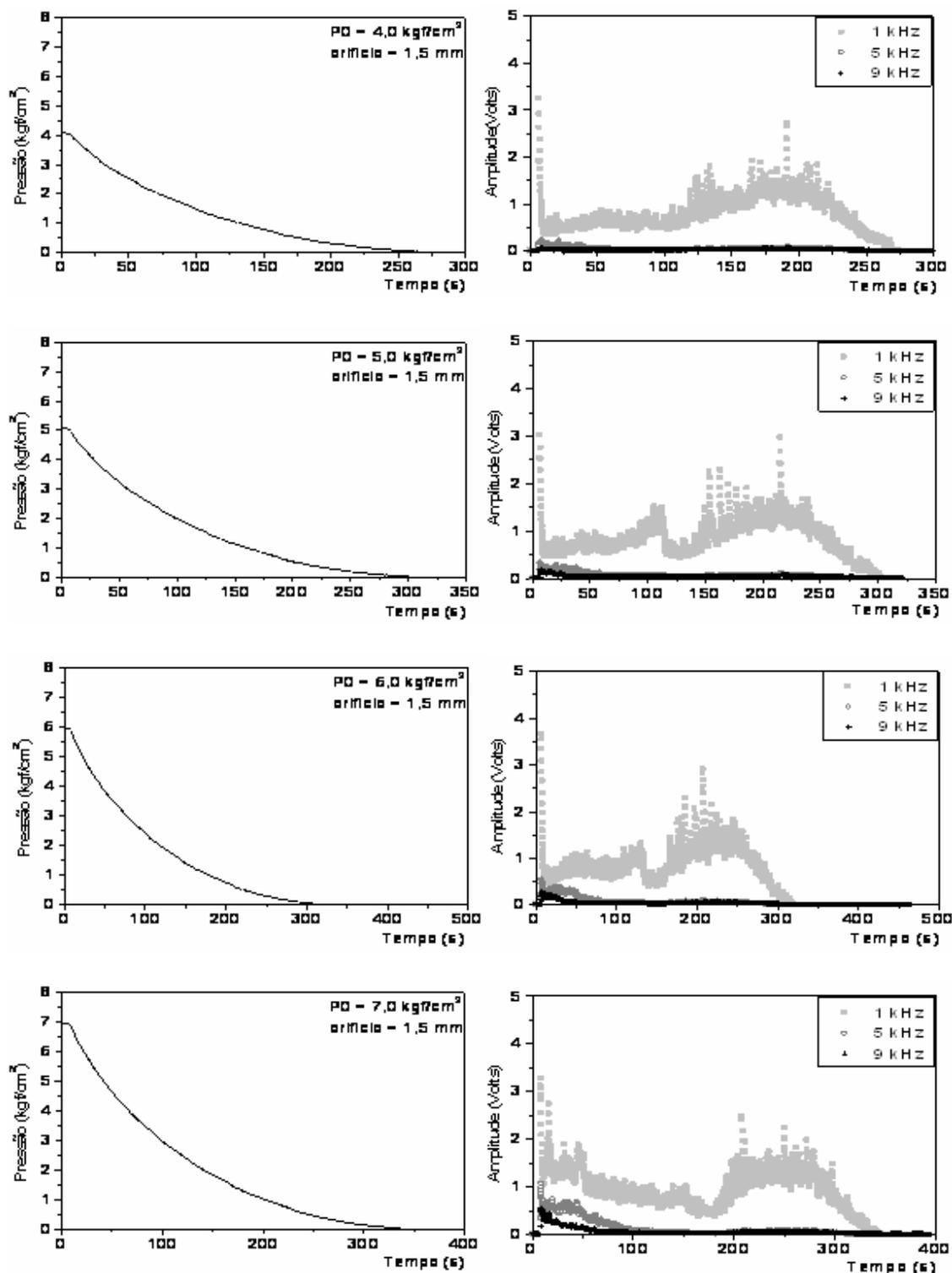


Figura A.22 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 1,5 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

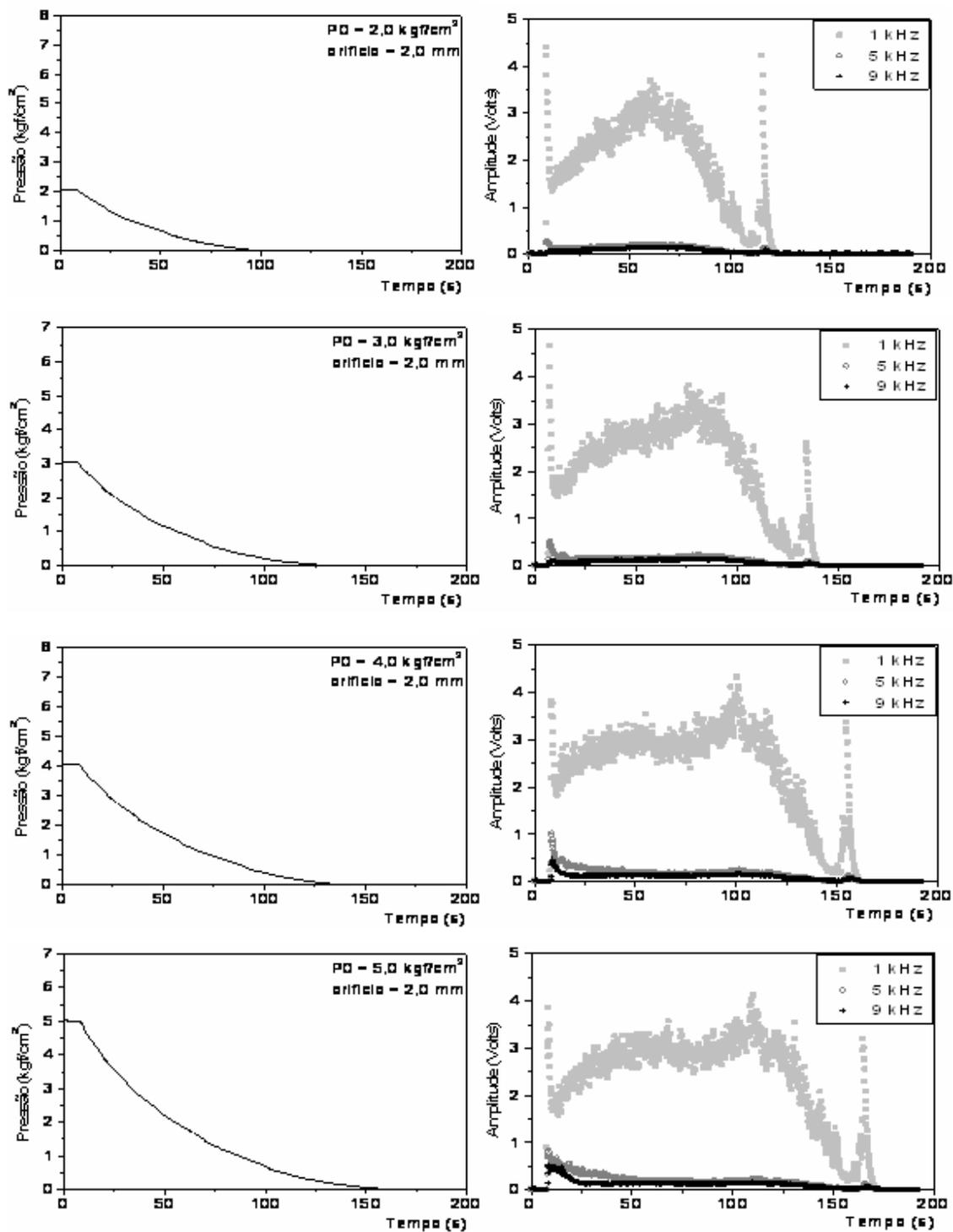


Figura A.23 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 2,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

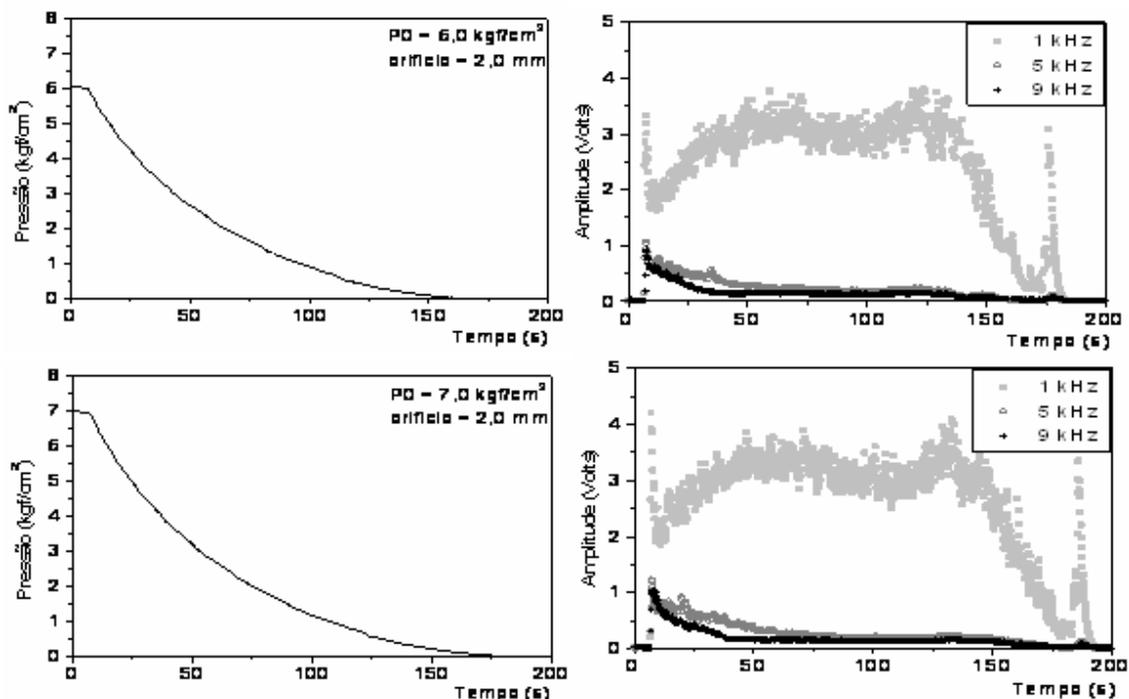


Figura A.24 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 2,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

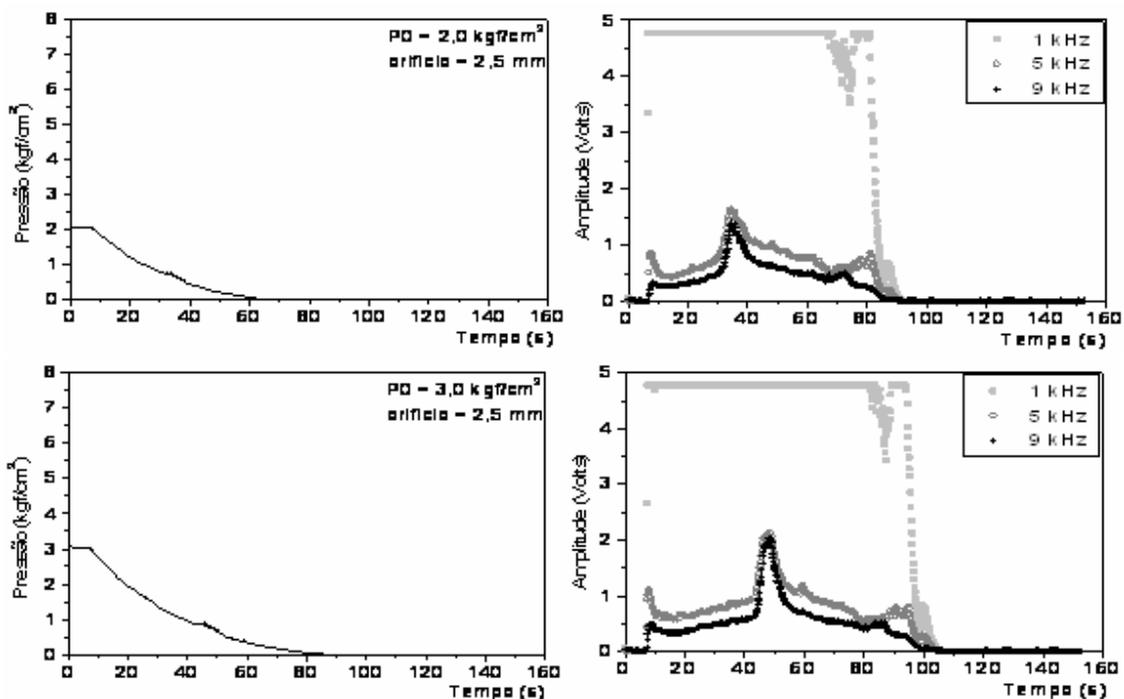


Figura A.25 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 2,5 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

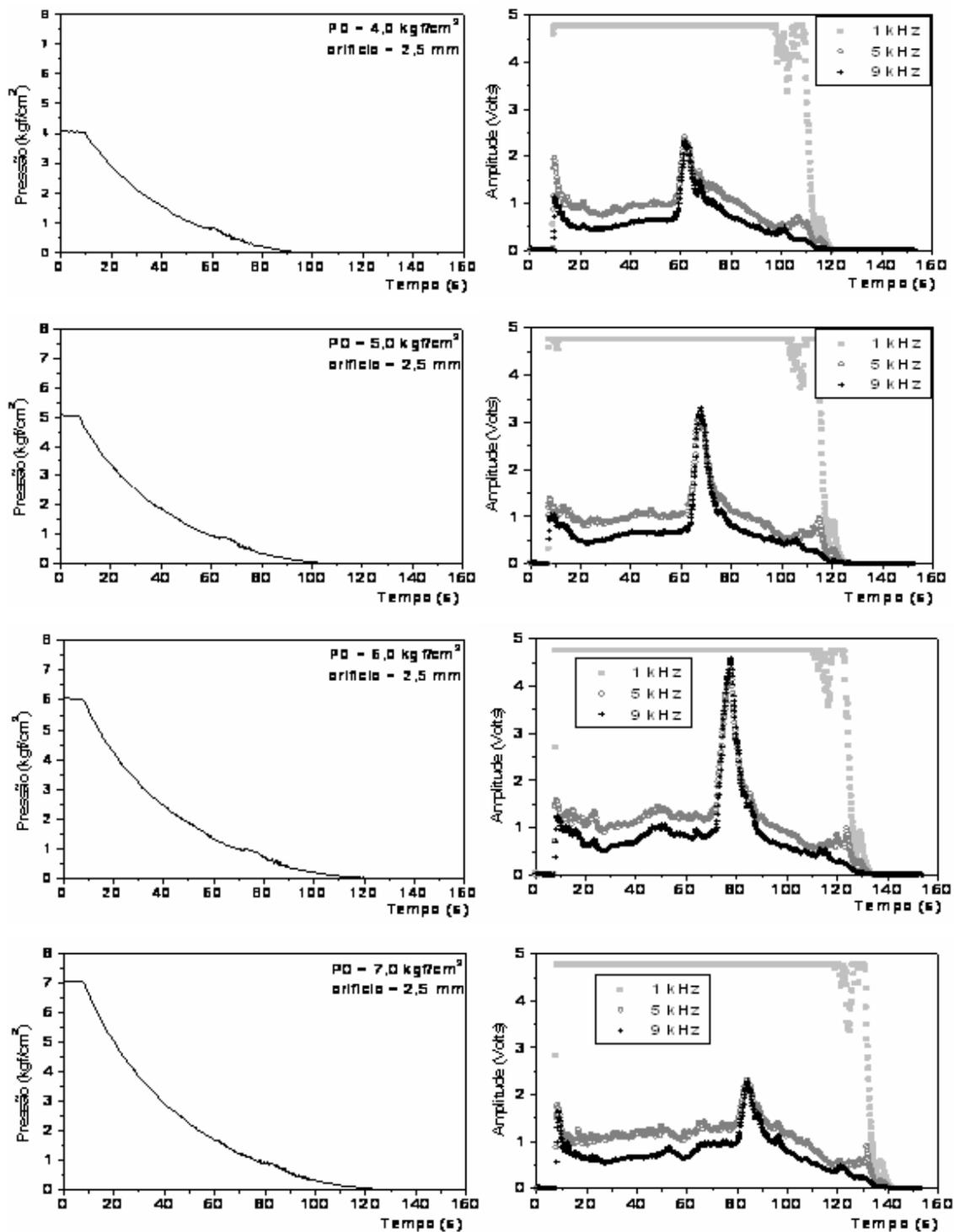


Figura A.26 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 2,5 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

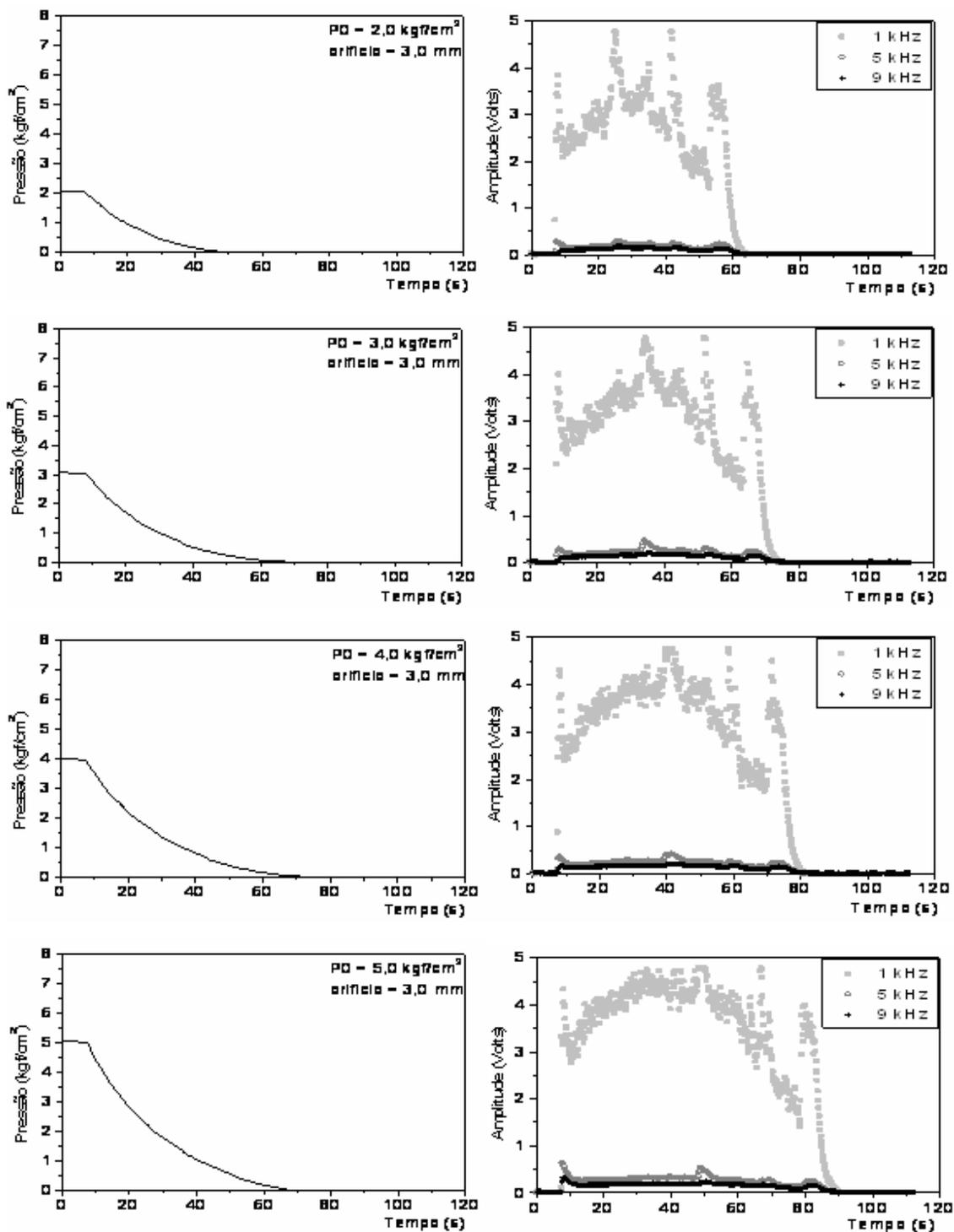


Figura A.27 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 3,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

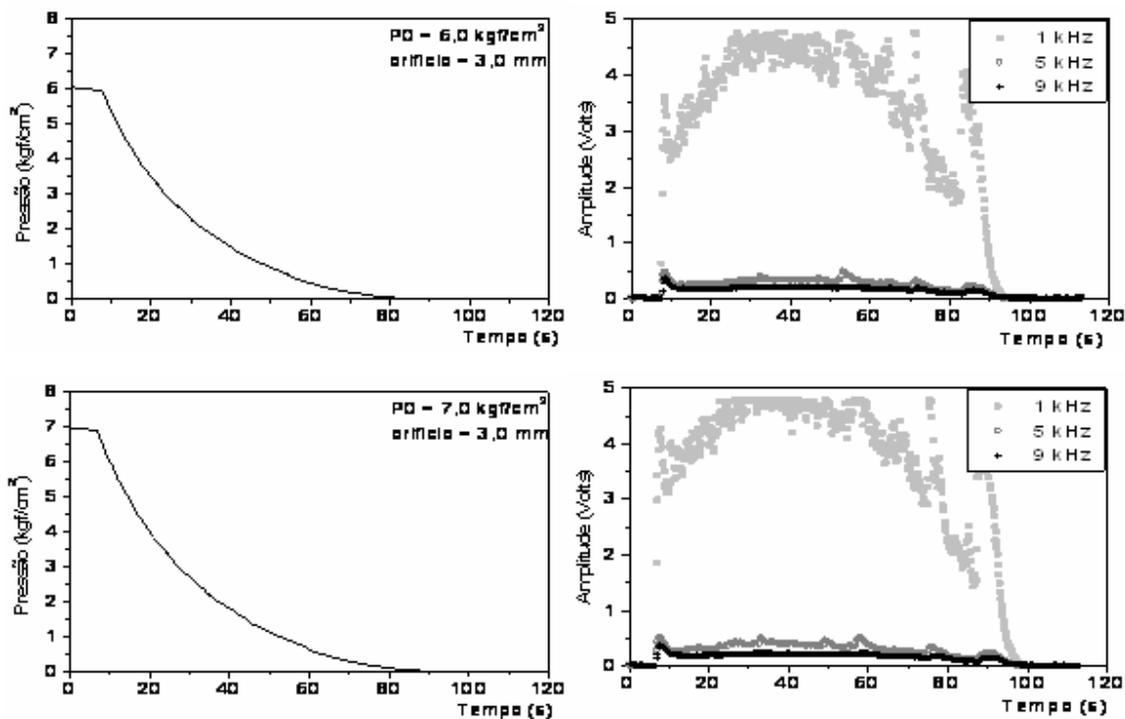


Figura A.28 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 3,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

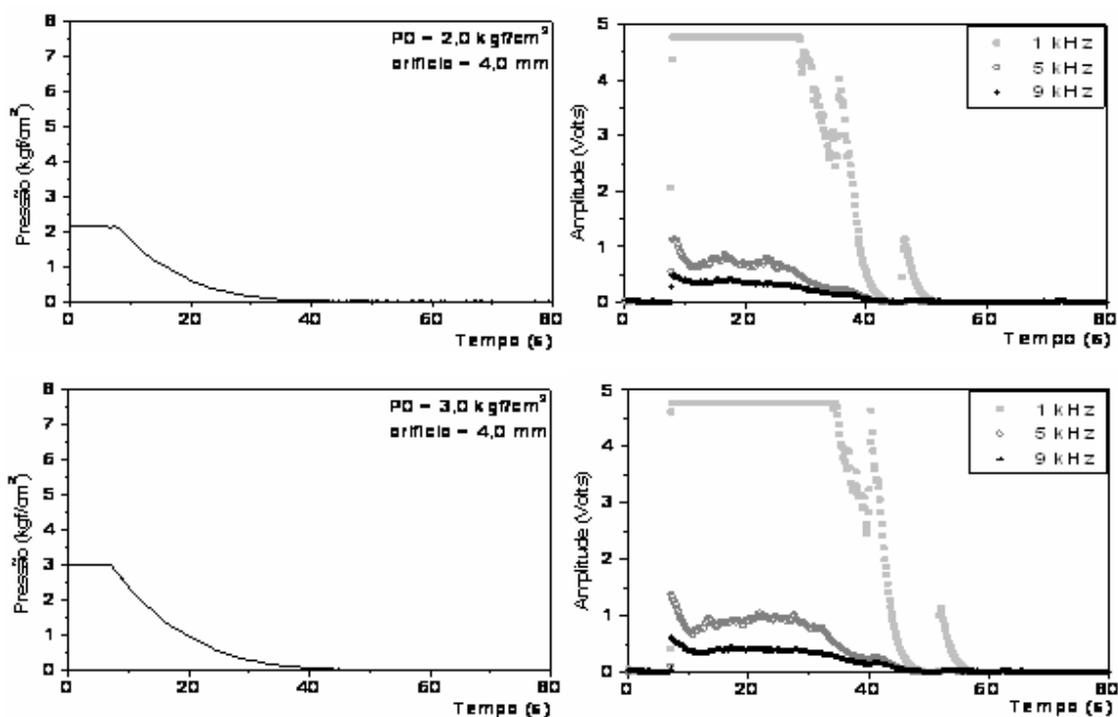


Figura A.29 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 4,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

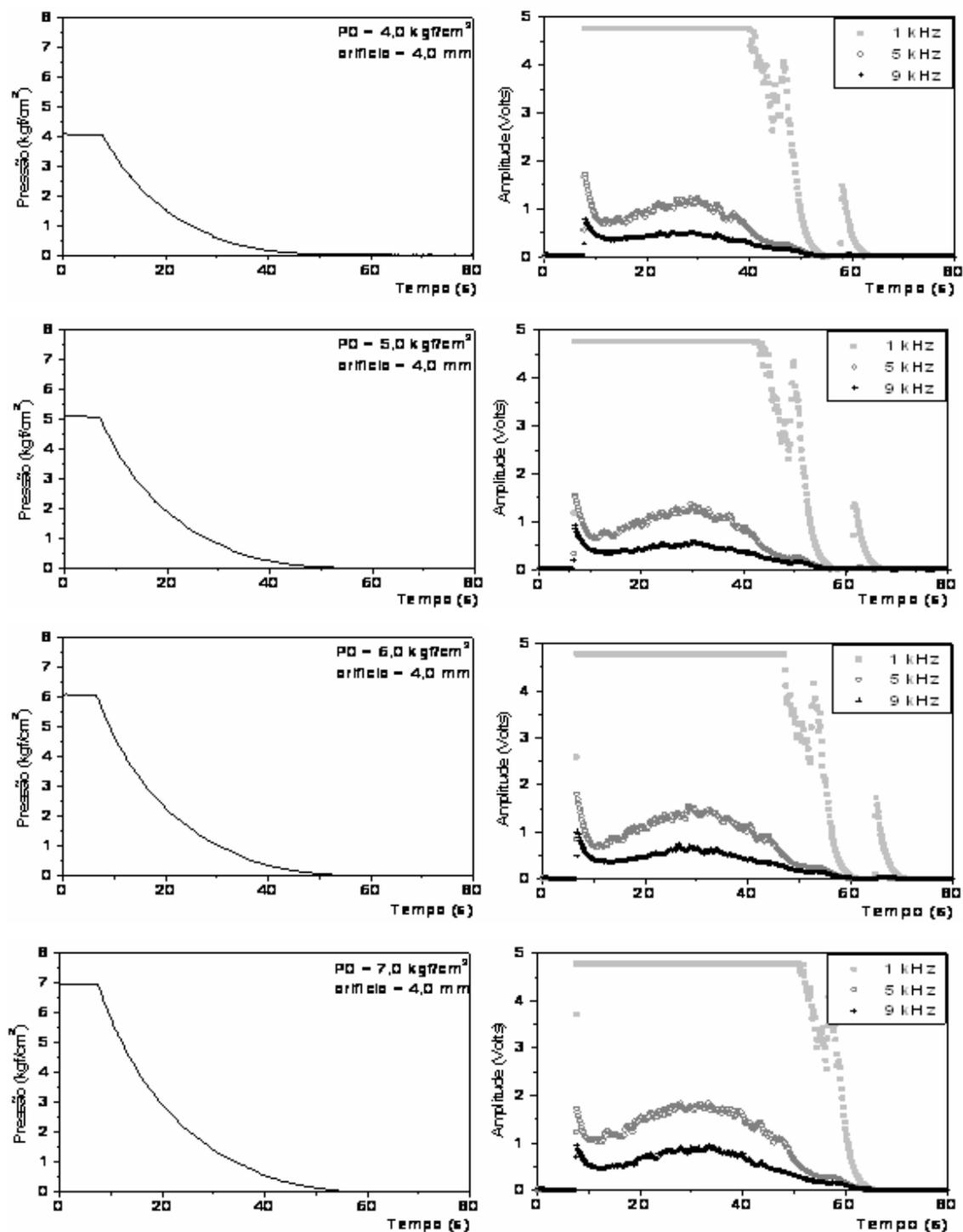


Figura A.30 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 4,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

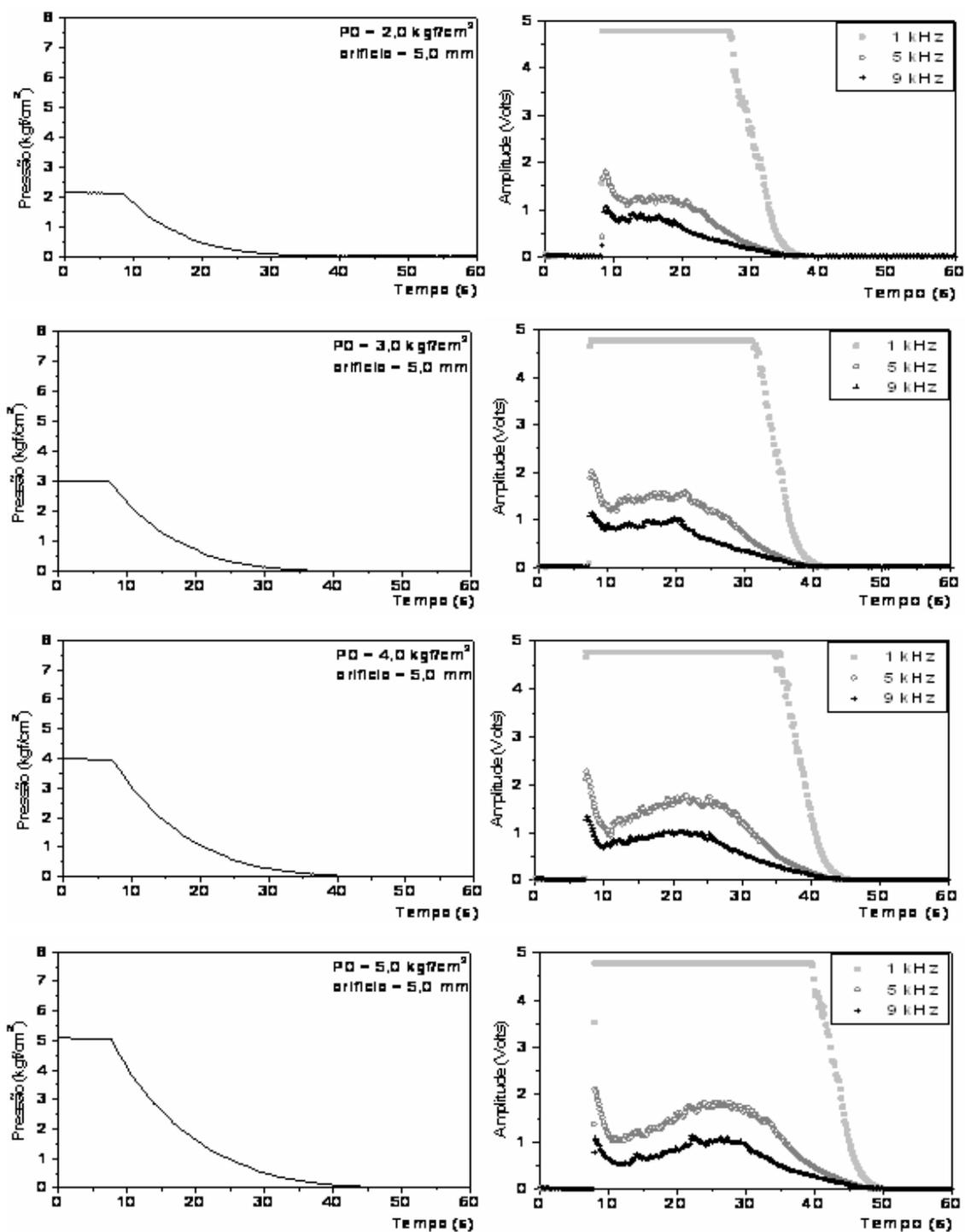


Figura A.31 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 5,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

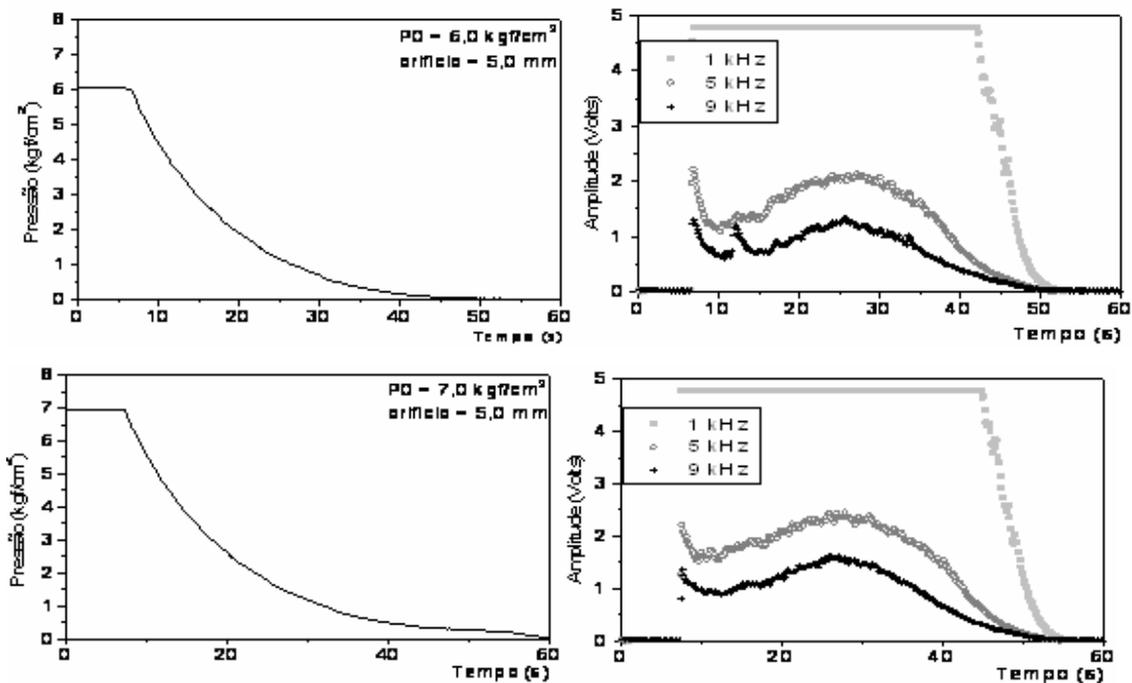


Figura A.32 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 5,0 mm). Tubulação sem alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

APÊNDICE B – TRANSIENTES DE PRESSÃO E AMPLITUDE DO RUÍDO SONORO CAUSADOS POR DIVERSOS TIPOS DE VAZAMENTOS EM UMA TUBULAÇÃO COM ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA DE AR.

Neste apêndice são apresentados os transientes de pressão e as variações em amplitude do ruído sonoro em uma tubulação com 60 metros de comprimento ligado a um vaso de pressão simulada experimentalmente com alimentação contínua de ar para várias condições de operação.

Os ensaios foram realizados utilizando diferentes pressões iniciais, diferentes diâmetros de orifícios e diferentes localizações do transdutor de pressão e do microfone. Durante a realização do experimento a tubulação foi mantida com a válvula de alimentação aberta e foi instalado um orifício de 0,8 mm na extremidade final da tubulação para mantê-la pressurizada. O tempo de duração de cada experimento foi o suficiente para que a tubulação readquirisse a pressão interna constante após a queda de pressão relativa à abertura da válvula.

Para a simulação de transientes de pressão e variações em amplitude do ruído sonoro foram utilizados os seguintes parâmetros:

➤ *Vaso de pressão:*

Material: botijão de gás

Armazenagem: $V_i = 34,5$ l de ar comprimido

Capacidade de pressão interna: $P_i = 19$ kgf/cm²

➤ *Tubulação:*

Material: ferro galvanizado

Comprimento: $L = 60$ m. Foram utilizadas 10 tubulações com 6 m cada uma.

Comprimento equivalente: $L_{eq} = 68,5$ m. Foram utilizados 18 cotovelos para unir os pedaços de 6 m que formam a tubulação; cada um com um comprimento equivalente a 0,474 m. Assim os 18 cotovelos correspondem a 8,5 m de comprimento.

➤ *Fluído:*

Gás escoando na tubulação: ar

Temperatura ambiente: $T = 25^{\circ}\text{C}$

➤ *Variáveis: condições de operação*

Pressão inicial: P_0 (kgf/cm²)

Amplitude: A (Volts)

x = posição do vazamento

y = posição do transdutor de pressão e do microfone

B.1 Transdutor de pressão e microfone instalados no vaso de pressão.

Os resultados dos experimentos com o transdutor de pressão e microfone localizados no vaso de pressão são mostrados nos gráficos a seguir, onde é possível observar o perfil do transiente de pressão e as variações em amplitude do ruído sonoro provocados pelo vazamento. Os orifícios utilizados para simular o diâmetro dos vazamentos foram: 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm, 2,5 mm, 3,0 mm, 4,0 mm e 5,0 mm, e as pressões iniciais utilizadas foram de 2,0 a 6,0 kgf/cm².

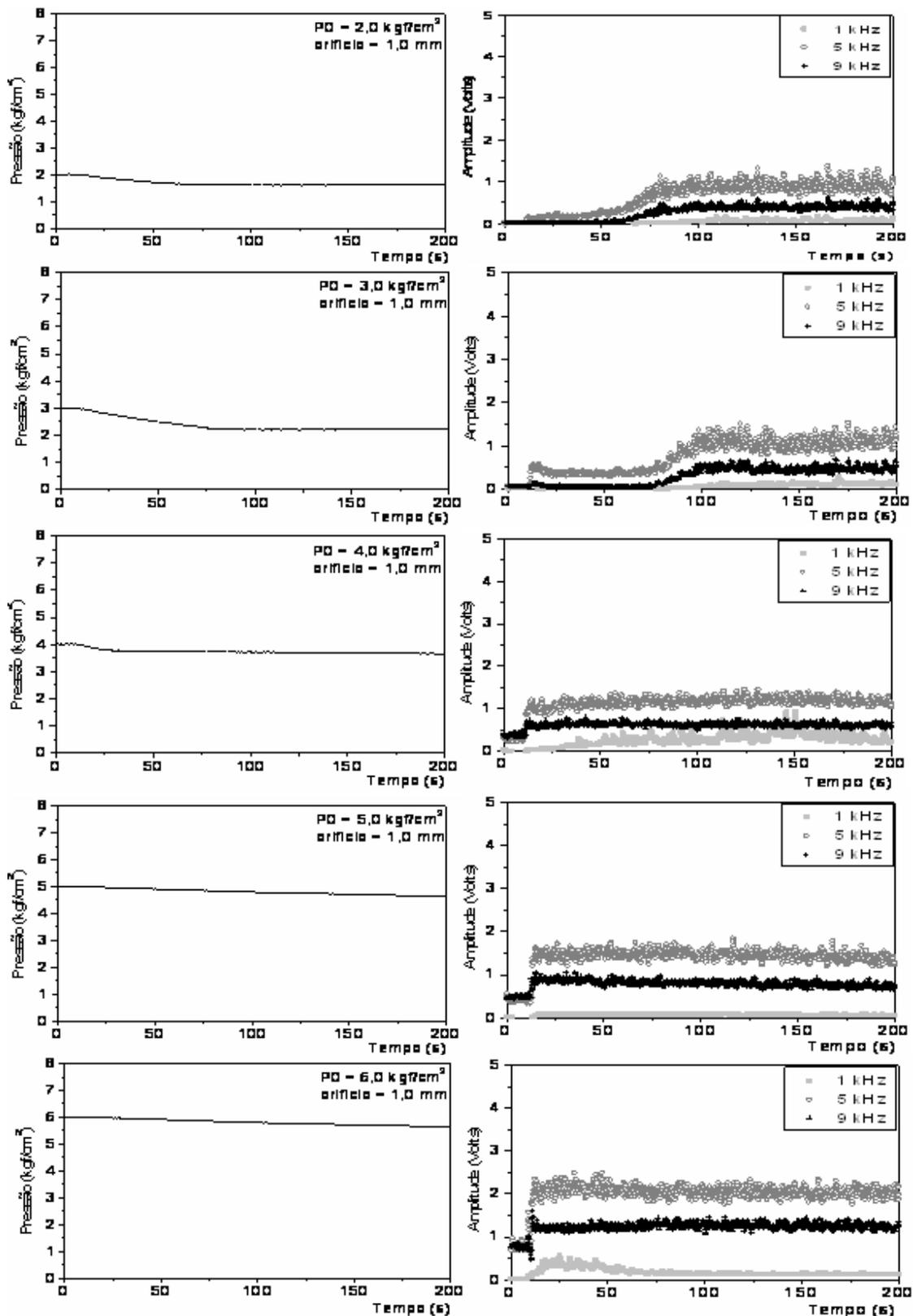


Figura B.1 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 1,0 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

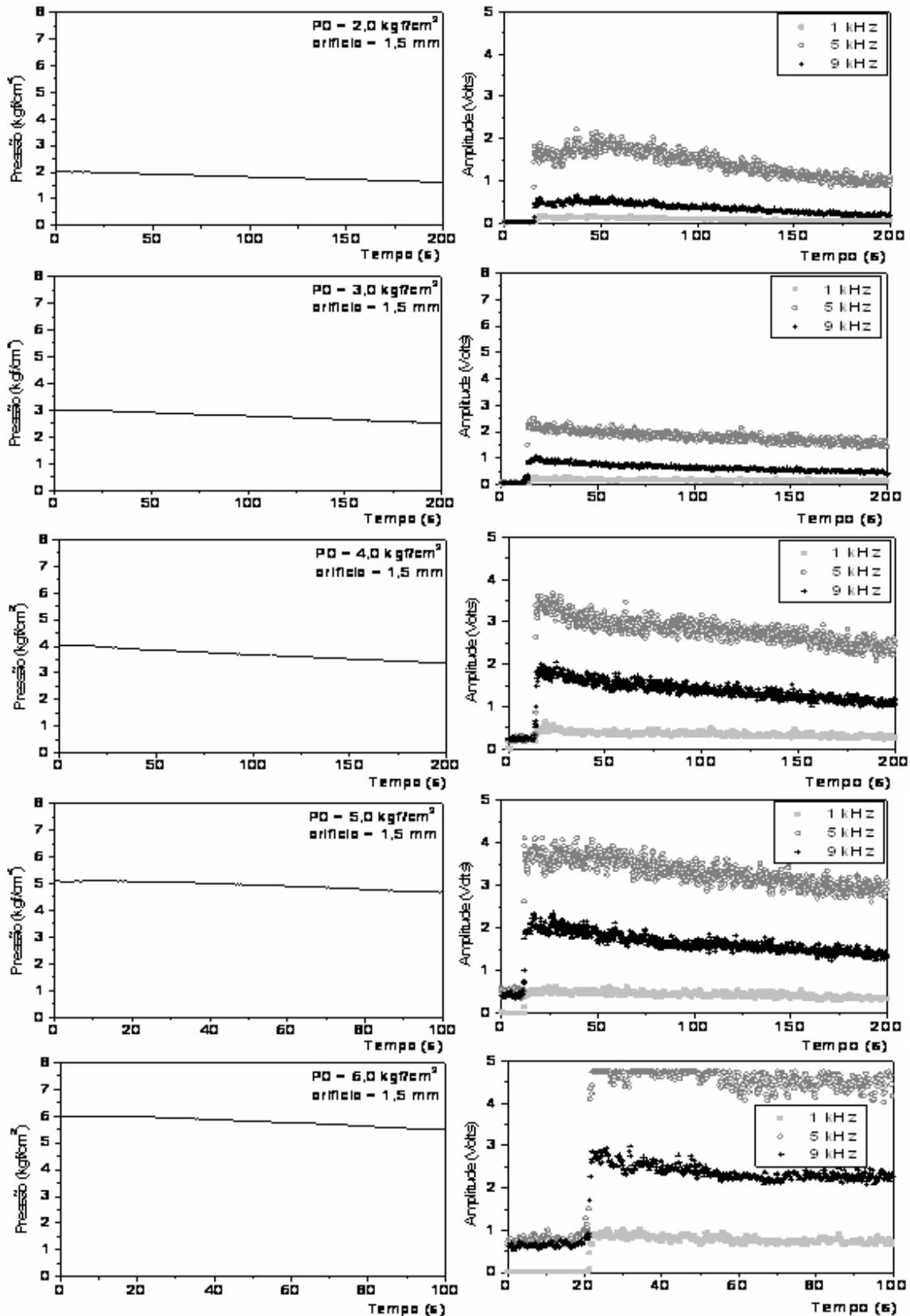


Figura B.2 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 1,5 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

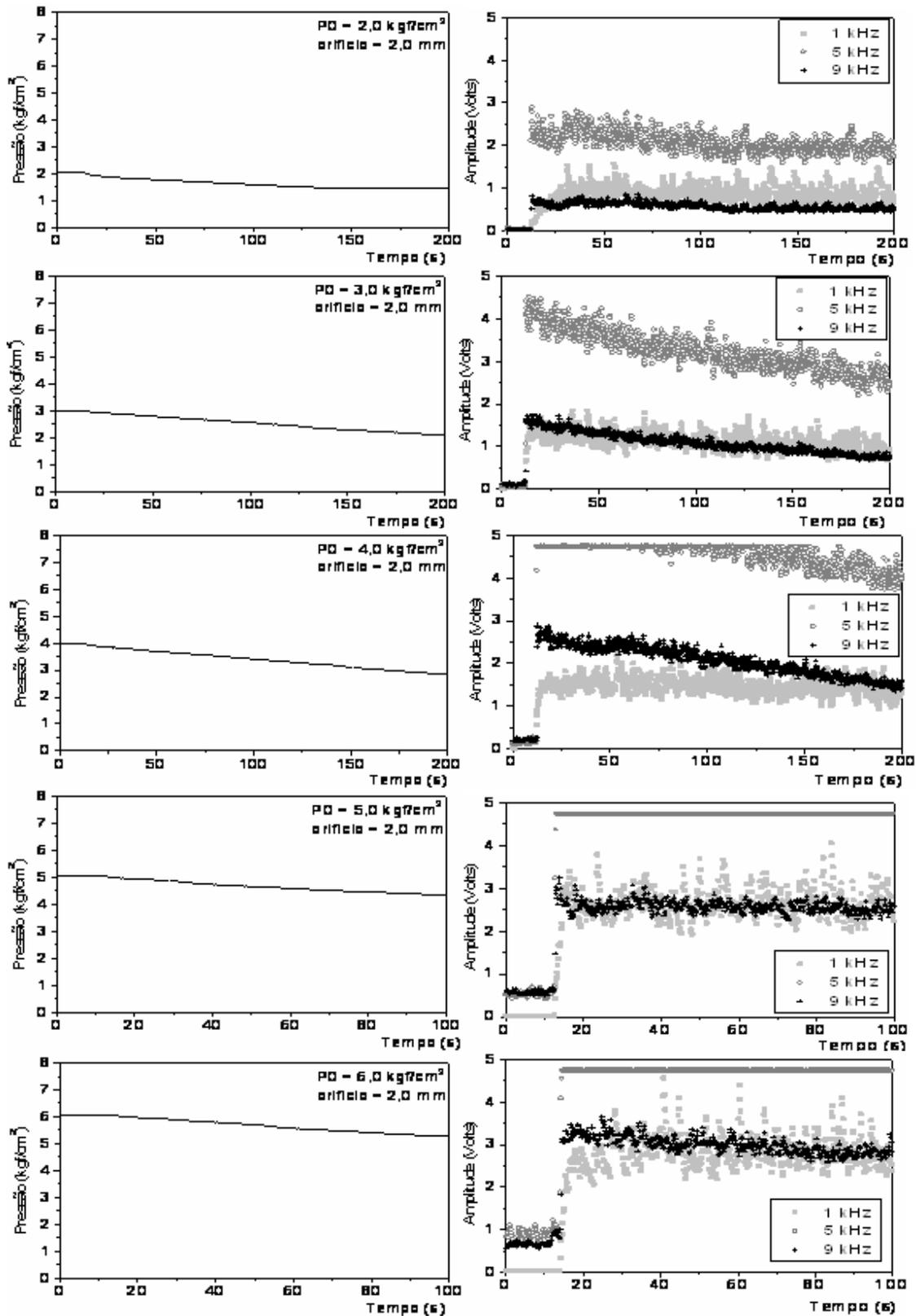


Figura B.3 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 2,0 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1.

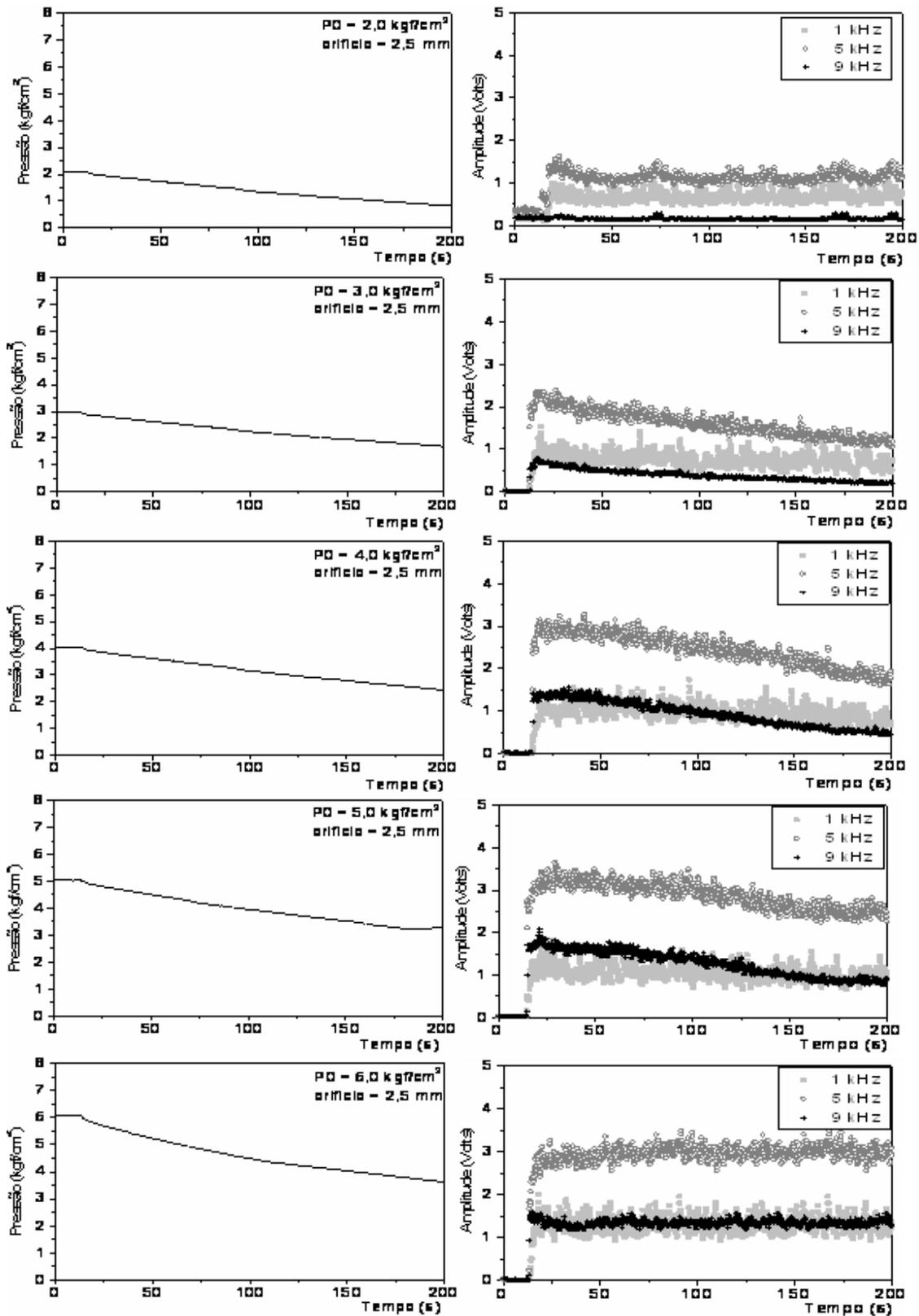


Figura B.4 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 2,5 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 0,1.

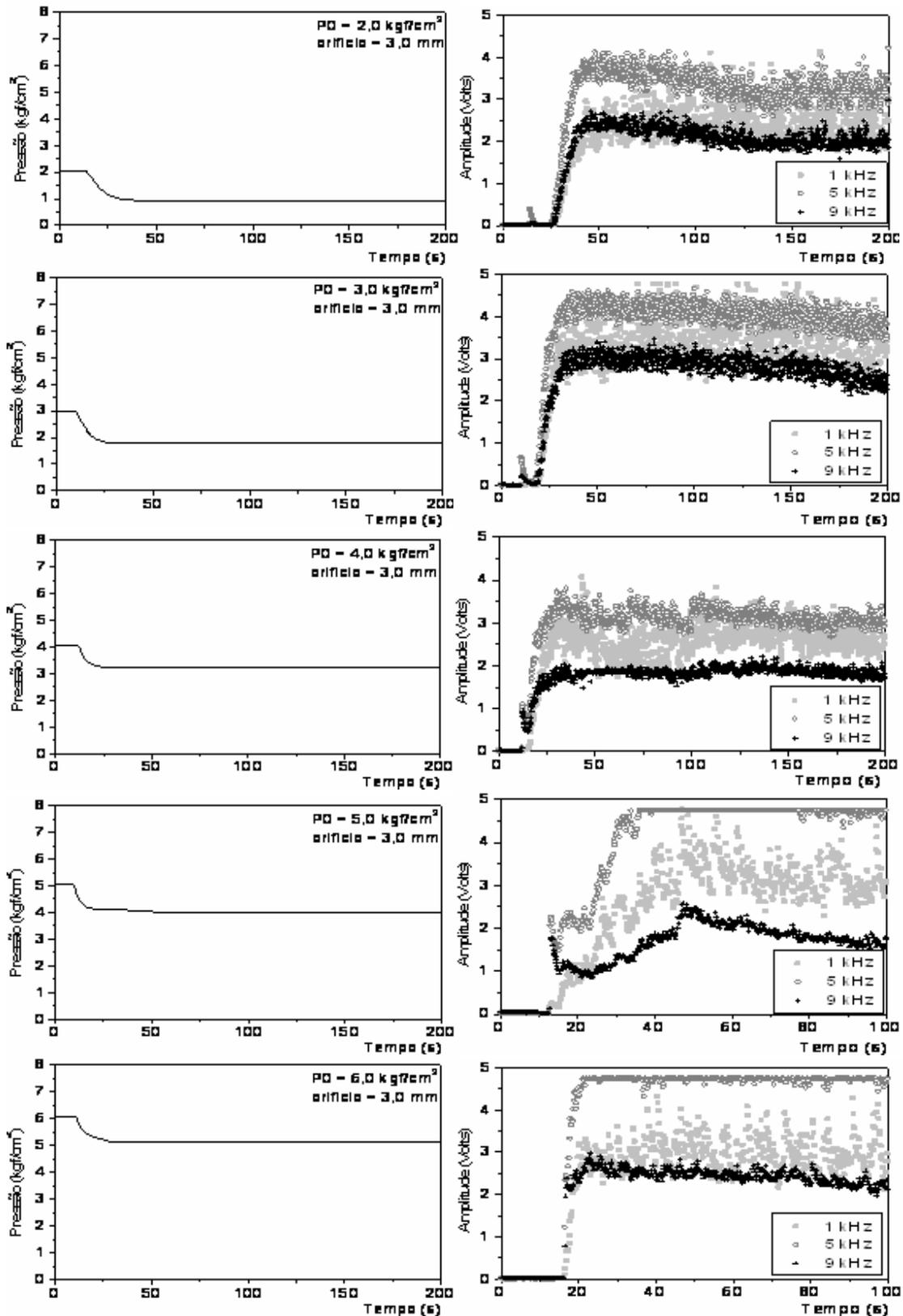


Figura B.5 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 3,0 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 0,1.

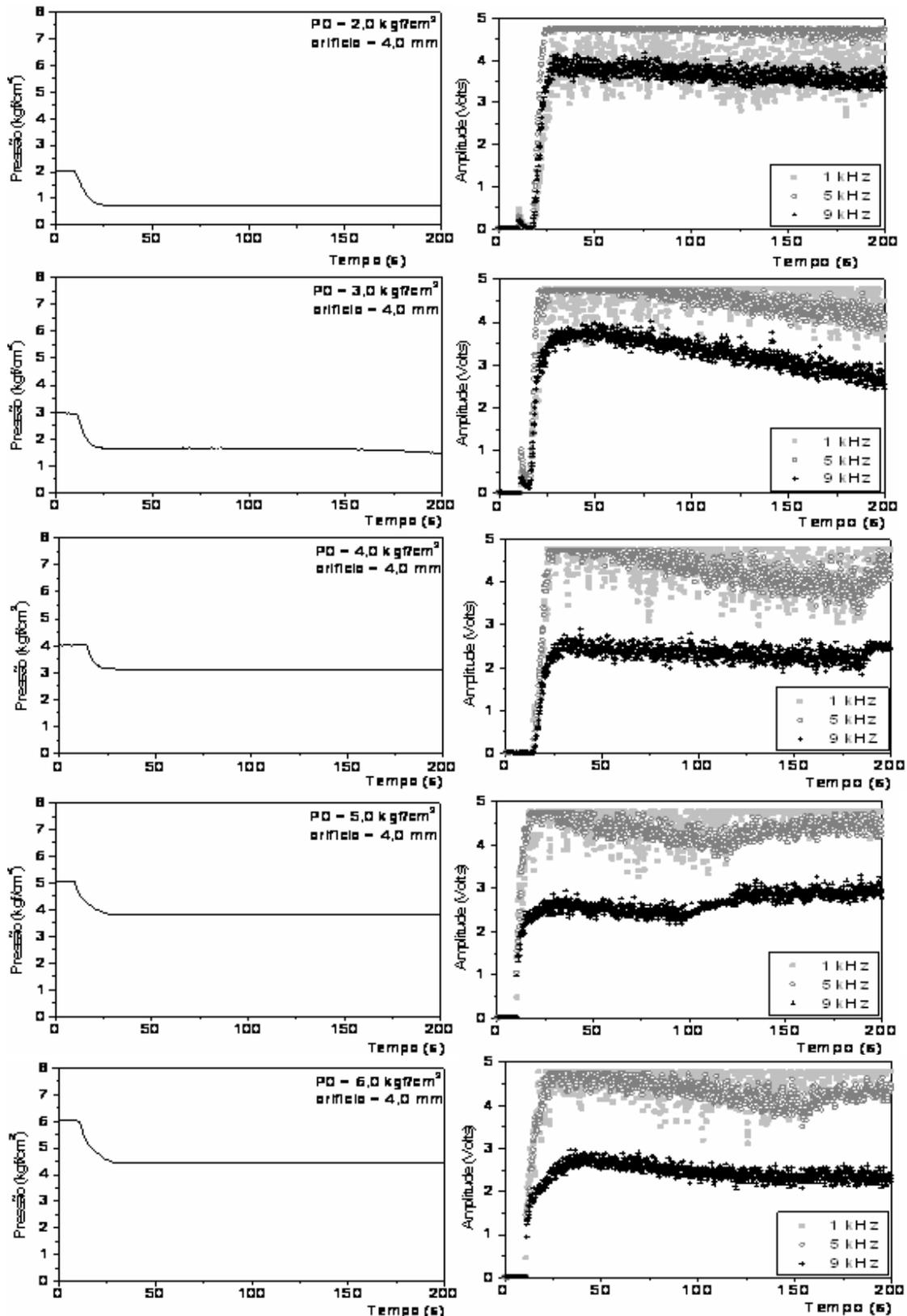


Figura B.6 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 4,0 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 0,1.

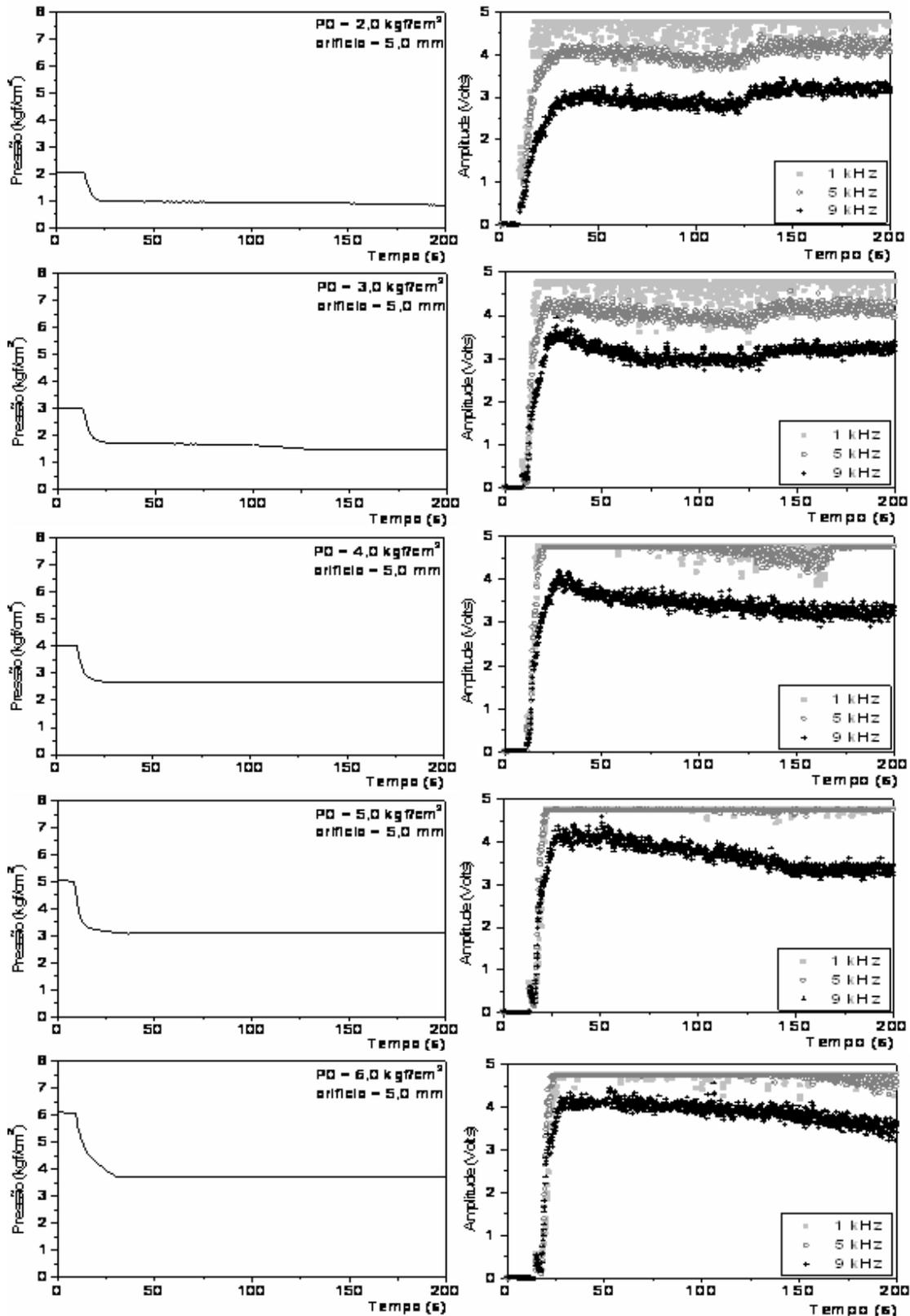


Figura B.7 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 5,0 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 0,1.

B.2 Transdutor de pressão e microfone instalados à entrada da tubulação.

Os resultados dos experimentos com o transdutor de pressão e microfone localizados no início da tubulação são mostrados nos gráficos a seguir, onde é possível observar o perfil do transiente de pressão e as variações em amplitude do ruído sonoro provocados pelo vazamento. Os orifícios utilizados para simular o diâmetro dos vazamentos foram: 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm, 2,5 mm, 3,0 mm, 4,0 mm e 5,0 mm, e as pressões iniciais utilizadas foram de 2,0 a 6,0 kgf/cm².

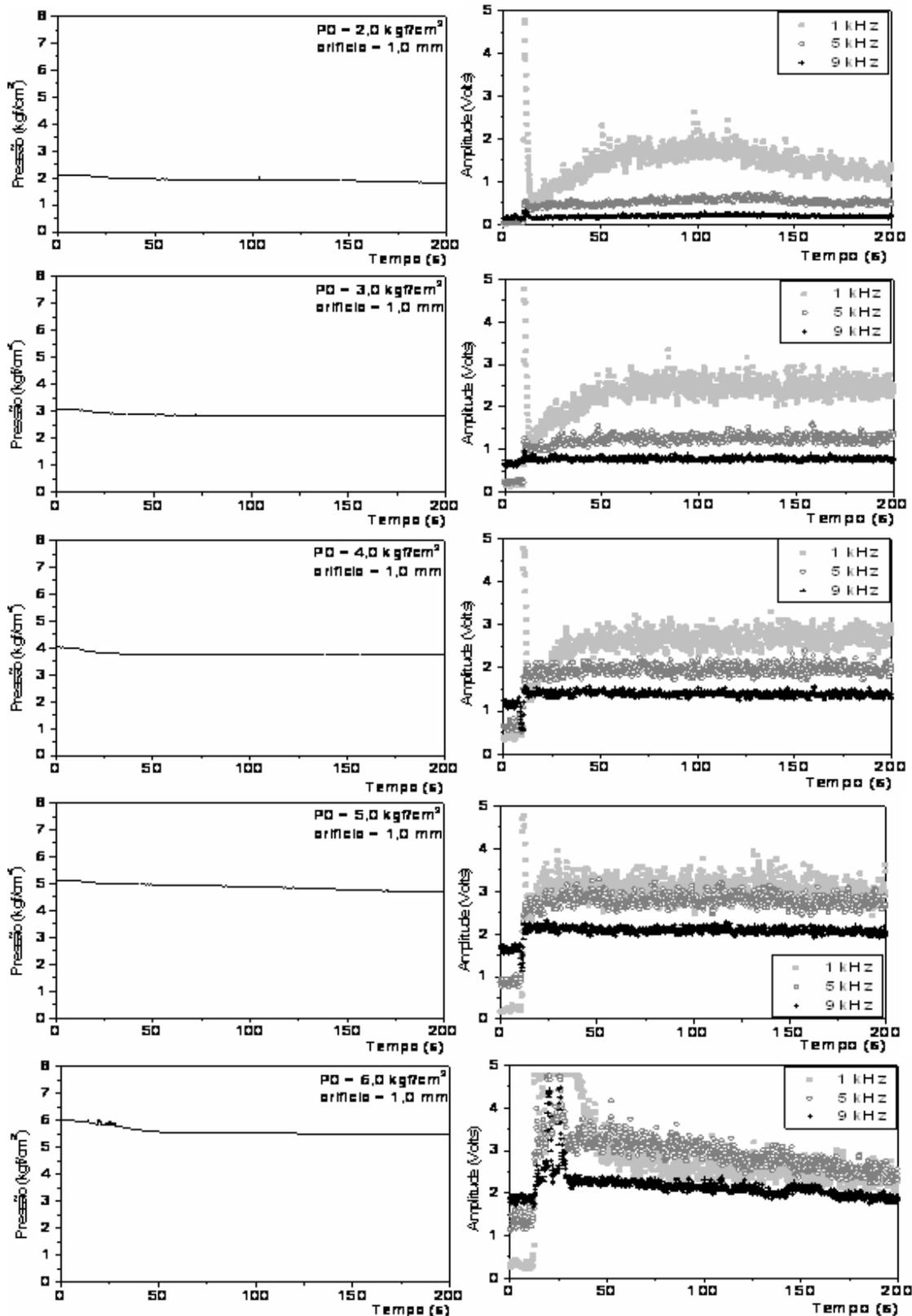


Figura B.8 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 1,0 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 4,0.

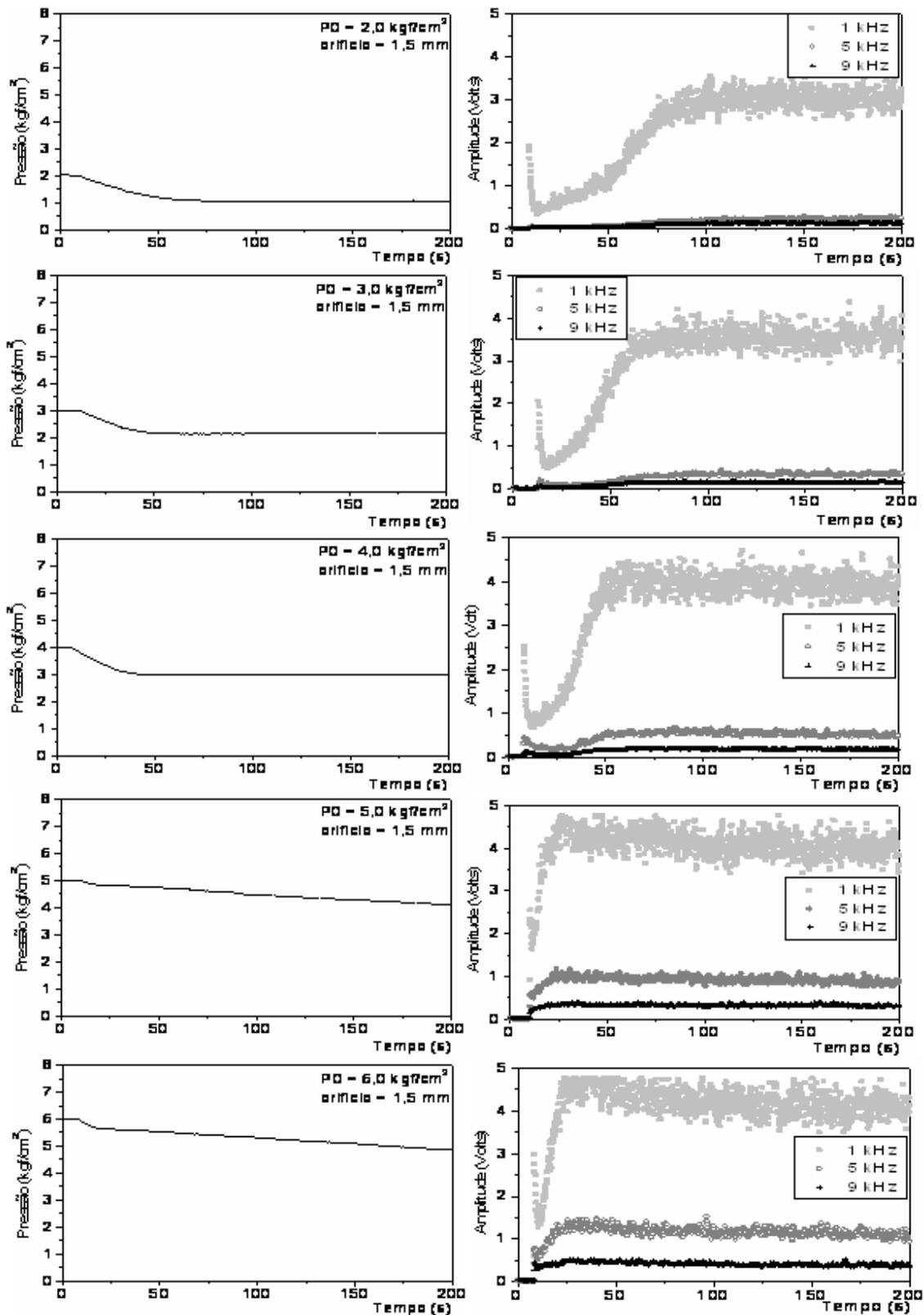


Figura B.9 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 1,5 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1,0.

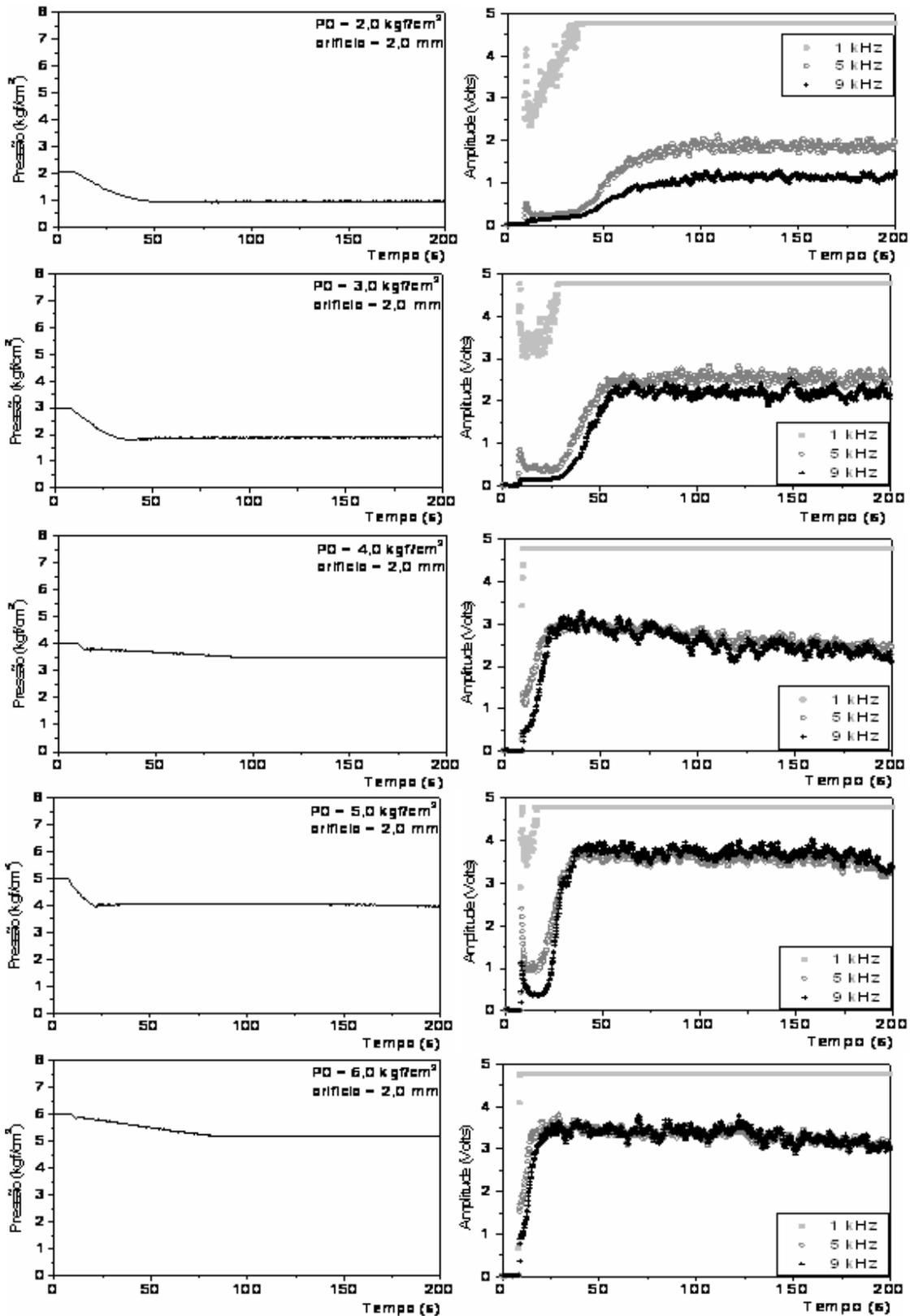


Figura B.10 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 2,0 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 1,0.

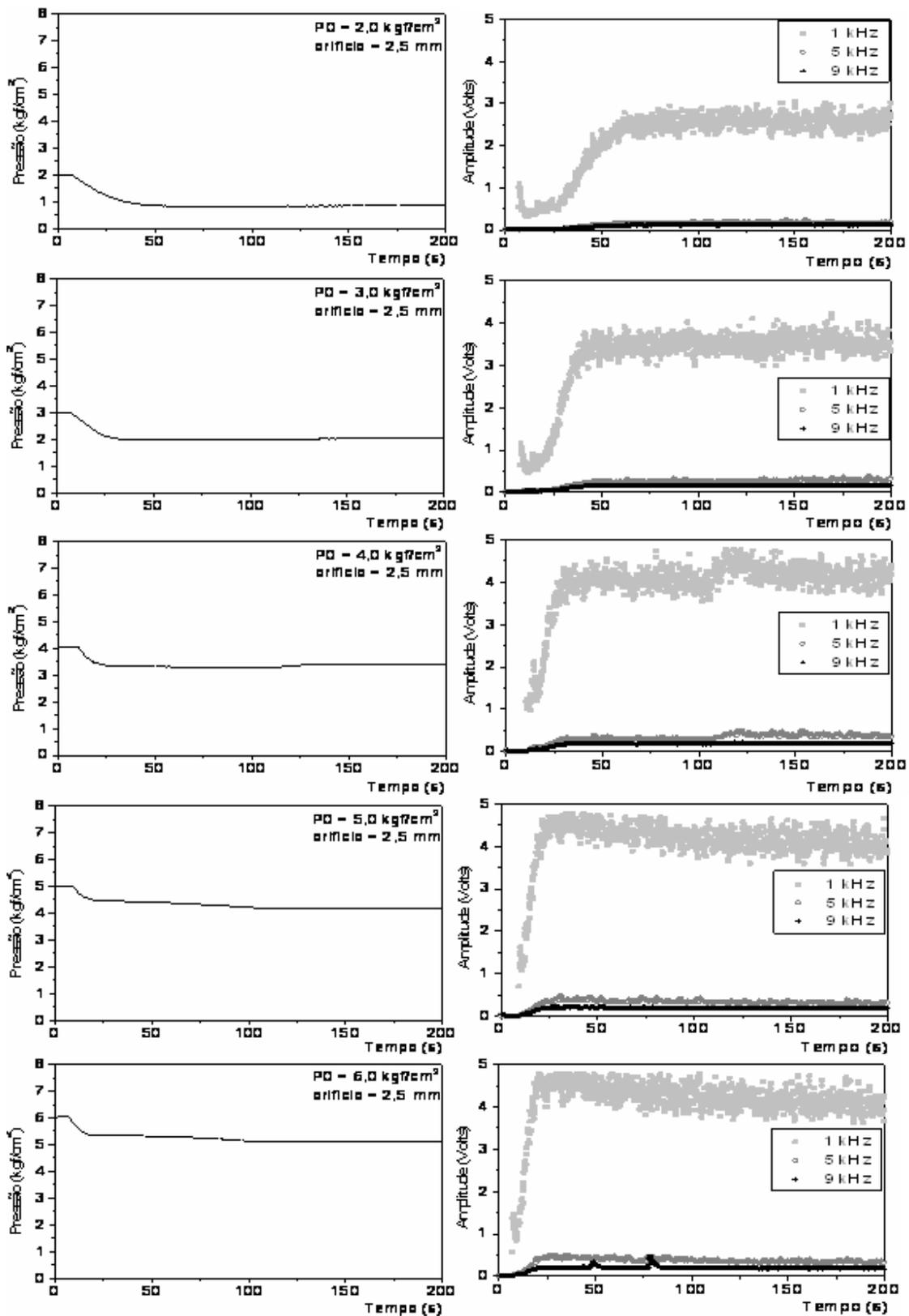


Figura B.11 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 2,5 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 0,1.

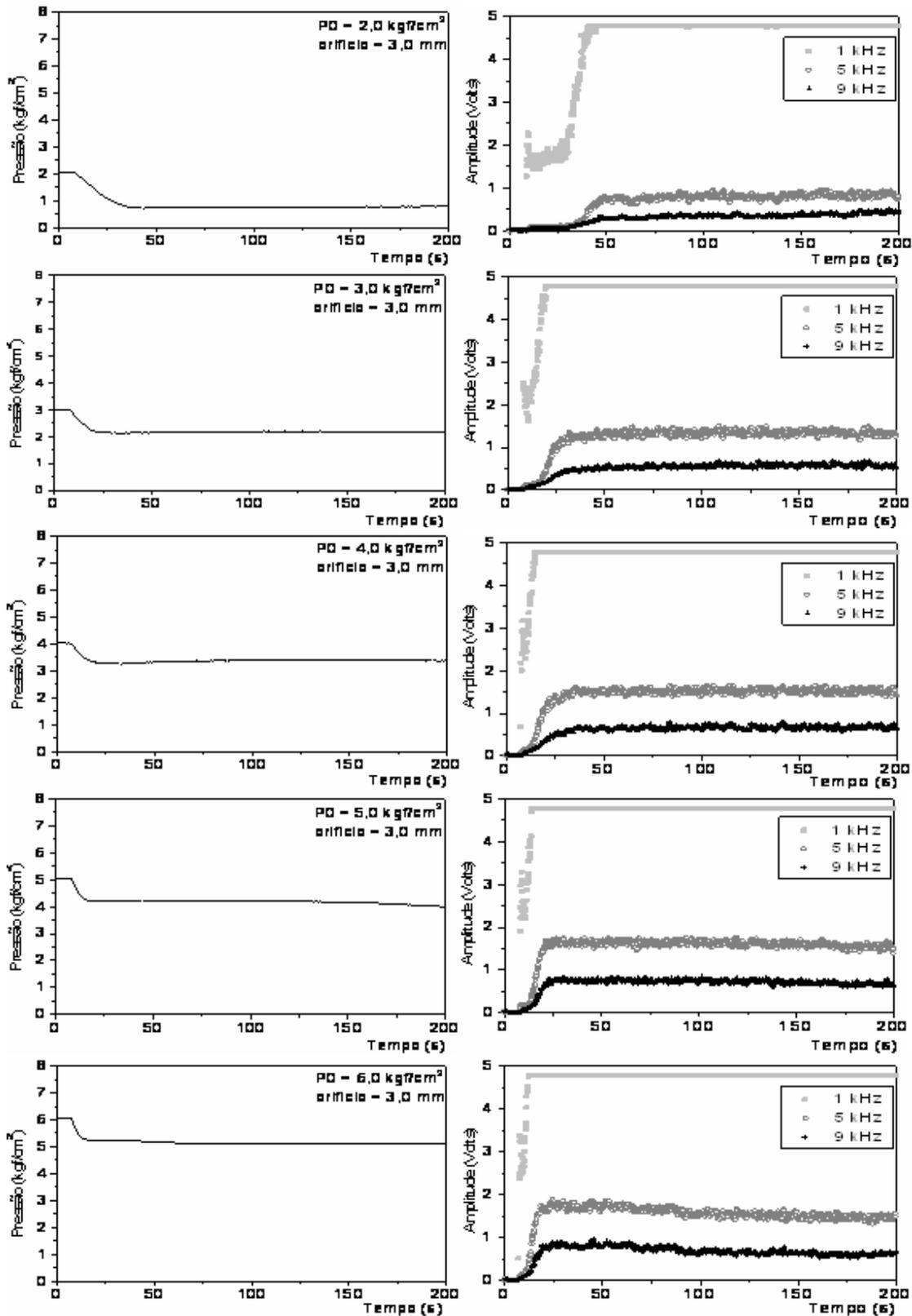


Figura B.12 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 3,0 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 0,1.

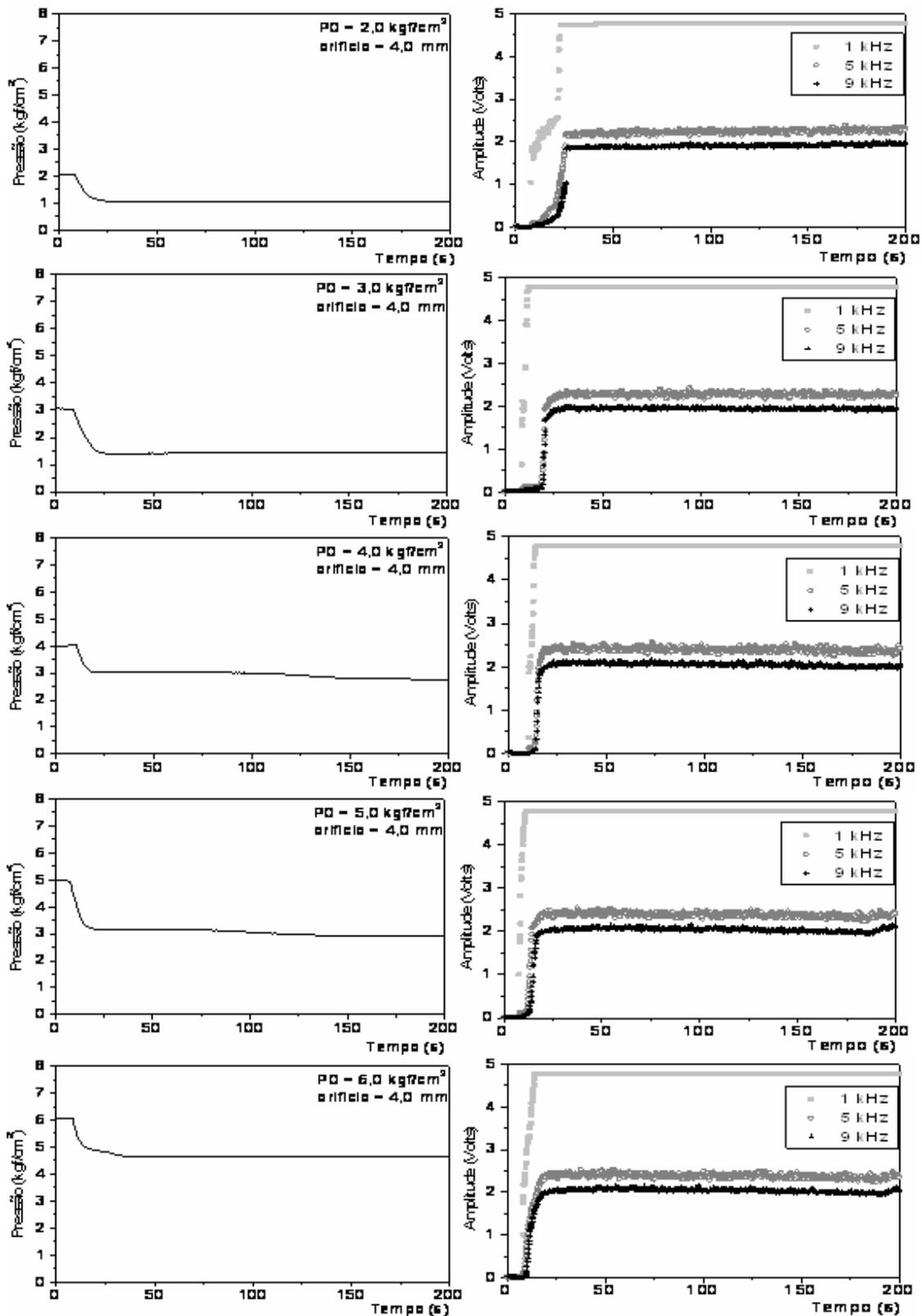


Figura B.13 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 4,0 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 0,1.

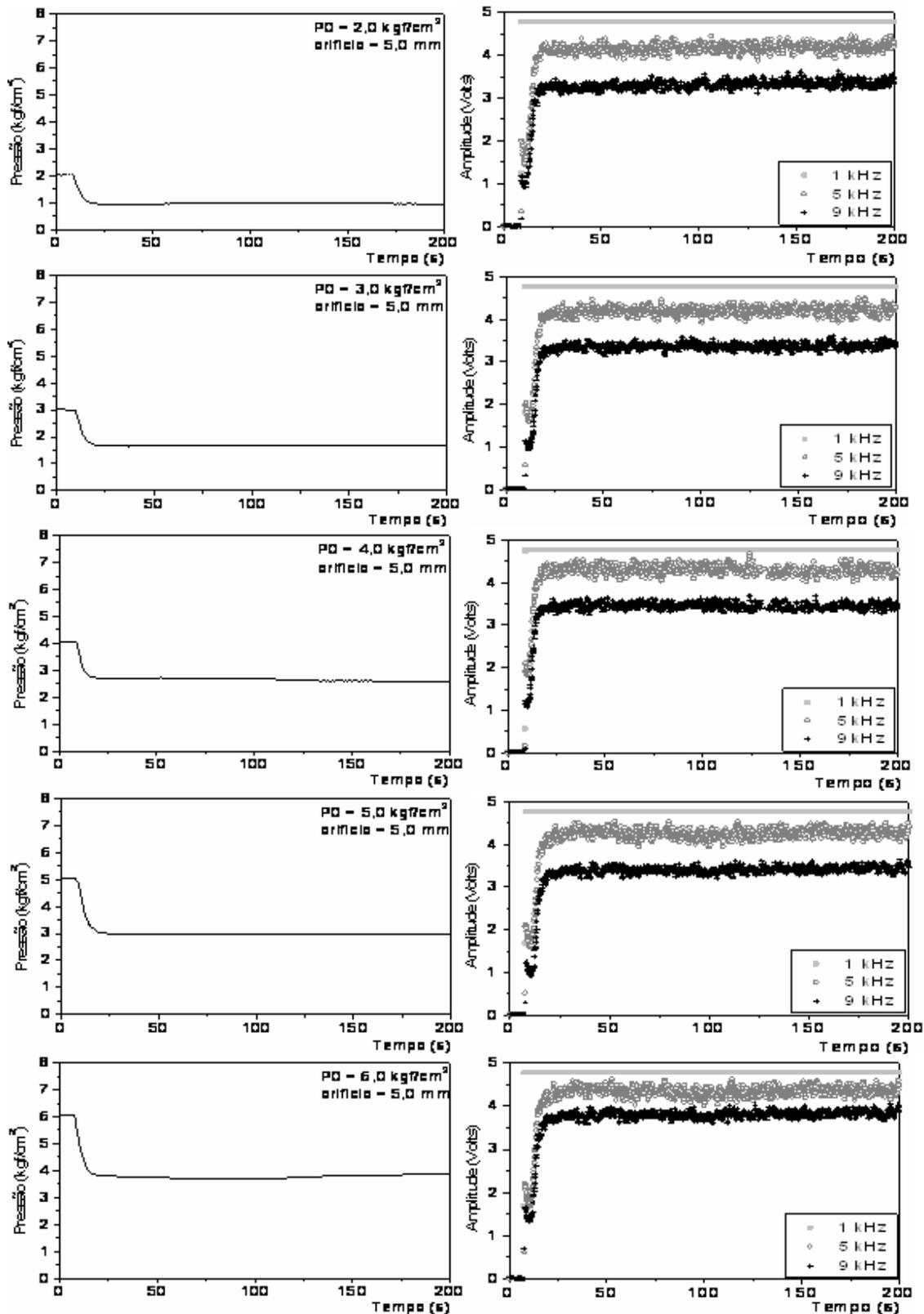


Figura B.14 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro (orifício 5,0 mm). Tubulação com alimentação contínua de ar e ganho no circuito banco de filtros igual a 0,1.

APÊNDICE C – PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA AQUISIÇÃO ON-LINE DOS DADOS PROVENIENTES DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO E DO MICROFONE.

O programa de aquisição de dados foi desenvolvido em linguagem C. As tarefas executadas pelo programa estão relacionadas no Capítulo 3

```

/*          PROGRAMA PARA AQUISICAO DE DADOS          */
/* ----- */
/*          ESTE PROGRAMA FAZ A AQUISICAO DE DADOS UTILIZANDO-SE:          */
/*          1- MICROFONE          - CANAL 1,3,5          */
/*          1- TRANSDUTOR DE PRESSAO          - 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 saida 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

/* ----- */
/*          DEFINICAO DOS BITS DE IMPORTANCIA          */
/* ----- */

#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 operacao 0-5V */
#define MASC1_5  0x29          /* Mascara no modo de operacao 1-5V */
#define MASC0_4  0x08          /* Mascara no modo de operacao 1-4V */
#define MASCBIP  0X23          /* Mascara no modo de operacao BIPOLAR */
#define TIME_OUT 2            /* Tempo de espera do fim da conversao A/D */

char init_conv;

/* ----- */
/*          DECLARACAO DAS VARIAVEIS 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\n    Departamento de Engenharia de Sistemas Quimicos - UNICAMP \n\n");
    printf("\n\n\n\n    Programa para deteccao continua de vazamento de gas \n ");
    printf("          em vazos de pressao          \n\n\n\n\n ");
    printf("\n\n\n\n\n\n\n Pressione alguma tecla para continuar  ");
    getch( );
    clrscr( );

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

    inicio:
    clrscr( );

```

```

printf("\n De 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," Pressao(kgf/cm2) ");
fprintf(arq1,"Filtro 1kHz ");
fprintf(arq1,"Filtro 5kHz ");
fprintf(arq1,"Filtro 9kHz \n\n");
printf("\n\n\n\n\n\n\n\n Aquisicao de dados experimentais ");
printf("\n\n\n Tecla <ENTER> para iniciar aquisicao de dados ");
getch();
clrscr();
initgraph(&graphdriver,&graphmode,"c:\\tc2"); /* inic.do mod.grafico */
cleardevice();
cont=0; /* conta o numero de pontos */
count=0; /* conta o numero de graficos */

/* ----- */
/* INICIO DA AQUISICAO 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 inicio 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; /* M,dia 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);
        soma4 = soma4 + read_anl(6,offset); /* Transdutor de Pressao*/
    }

    P0 = 5*(((soma1/pnt)/(4095.0))-0.046);
    P1 = 5*(((soma2/pnt)/(4095.0))-0.051);
    P2 = 5*(((soma3/pnt)/(4095.0))-0.0426);
    P3 = 20*(((soma4/pnt)-1012)/((4095.0)-1012))-0.0122);

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

/* codigos responsaveis pelo arquivo continuo dos dados */
    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 grafico */
    ix =cont + 40;          /* coordenada x */
    iy = 220.0 -40.0*P0;    /* coordenada y */
    putpixel(ix,iy,13);    /* introducao do ponto P0*/
    ix =cont + 40;          /* coordenada x */
    iy = 220.0 - 40*P1;    /* coordenada y */
    putpixel(ix,iy,25);    /* introducao do ponto P1*/
    ix =cont + 40;          /* coordenada x */
    iy = 220.0 - 40*P2;    /* coordenada y */
    putpixel(ix,iy,26);    /* introducao do ponto P2*/
    ix = cont + 40;        /* coordenada x */
    iy = 450.0 - 20*P3;    /* coordenada y */
    putpixel(ix,iy,14);    /* introducao do ponto P3*/
}

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

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

    settxtjustify(1,0);
    settxtstyle(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<=550;i=i+50)
    {
        ix = i + 40;
        line(ix,218,ix,222);
        ticx = 1.0*i+550*(count-1);
        gcvt(ticx,3,&buf);
        outtextxy(ix+2,235,&buf);
        ixx = i + 40;
        line(ixx,448,ixx,453);
        ticy = 1.0*i+550*(count-1);
        gcvt(ticy,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);
settextjustify(1,0);
settextstyle(0,0,1);
outtextxy(600,245,"Pontos");
settextjustify(1,1);
settextstyle(0,1,1);
outtextxy(4,100,"Amplitude (V)");
settextjustify(1,1);
settextstyle(0,1,1);
outtextxy(4,340,"Pressao (kgf/cm2)");
}

/* ----- */
/*          SUBROTINA DE SELECAO 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);
}

/* ----- */
/*          INICIO 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 );
}

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

selchad(canal)
unsigned char canal;
{
    unsigned char chad;
    chad = canal << 5;
    chad &= 0xe0;
    outportb(base + CTL,chad);
    modoper |= BSHEAN;
    outportb(base + ADSTS,modoper);
    modoper &= ~BSHEAN;
    outportb(base + ADSTS,modoper);
    return(canal);
}

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

void selchda(unsigned char canal)
{
    unsigned char chda;
    canal &= 0x07;
    chda = (canal << 5);
    chda |= canal;

    chda |=BSHSA;
    outportb(base + CTL,chda);
}

/* ----- */
/*                               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 conversão 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);
}

/* ----- */
/*          ESCREVE O VALOR DE DADO NA SAIDA ANALOGICA 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 nao existe o sinal de referencia de 3.500V na          */
/*                   entrada analogica 7          */
/*          200h -> Se em 4 tentativas de ajustar o offset isto nao          */
/*                   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)
        trigger = 0xa00;
    else
        trigger = 0xb33;
    inatual = read_anl(7,140);
    if(inatual < (trigger - 0x100))
        return(0x100);
    for(i=0;flag ==0;++i)
    {
        inatual = read_anl(7,(i&0xff));
        for(delay=0;delay<50;++delay)
            if(inatual == trigger)
            {
                flag = 1;
                if(i == 0x400)
                    return(0x200);
            }
        return(i-1);
    }
}

/* ----- */
/*
    ROTINA PARA SELECAO AUTOMATICA DO MODO DE OPERACAO
    ACEITA OS SEGUINTEs PARAMETROS:
    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;
    switch(n)
    {
        case 1:
            masc = MASC1_5;
            break;
        case 2:
            masc = MASC0_4;
            break;
        case 3:
            masc = MASCBIP;
            break;
    }
    modoper = masc;
    outportb(base+ADSTS,masc);
}
/* ----- */

```

