

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS QUÍMICOS

Elisângela Orlandi de Sousa Gonçalves

**DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS EM
TUBULAÇÕES UTILIZANDO SISTEMAS ACÚSTICOS E
REDES NEURAIAS**

Campinas – SP – Brasil

Fevereiro – 2012

Elisângela Orlandi de Sousa Gonçalves

**DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS EM
TUBULAÇÕES UTILIZANDO SISTEMAS ACÚSTICOS E
REDES NEURAIIS**

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Sandra Lúcia da Cruz
Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a Ana Maria Frattini Fileti

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DE DOUTORADO
DEFENDIDA PELA ALUNA ELISANGELA ORLANDI DE SOUSA GONÇALVES

Campinas - SP

Fevereiro – 2012

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

G586d	<p>Gonçalves, Elisângela Orlandi de Sousa Detecção e localização de vazamentos em tubulações utilizando sistemas acústicos e redes neurais / Elisângela Orlandi de Sousa Gonçalves. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.</p> <p>Orientador: Sandra Lúcia da Cruz. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.</p> <p>1. Gas - Vazamento. 2. Detectores de vazamentos. 3. Sinal-ruído (Acústica). 4. Redes neurais (Computação). I. Cruz, Sandra Lúcia da. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.</p>
-------	---

Título em Inglês: Leak detection and location in pipelines through acoustic method
and neural networks

Palavras-chave em Inglês: Gas - Leak, Leak detectors, Signal to Noise (Acoustic),
Neural Networks (Computer)

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Doutor em Engenharia Química

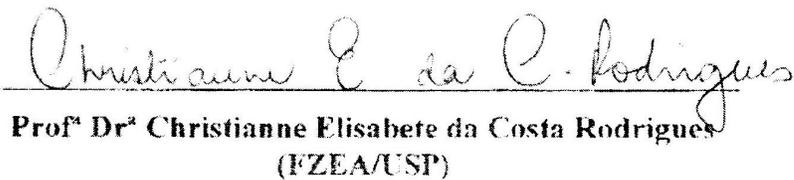
Banca examinadora: Christianne Elisabete da Costa Rodrigues, Fábio Delatore, Roger
Josef Zemp, Sérgio Persio Ravagnani

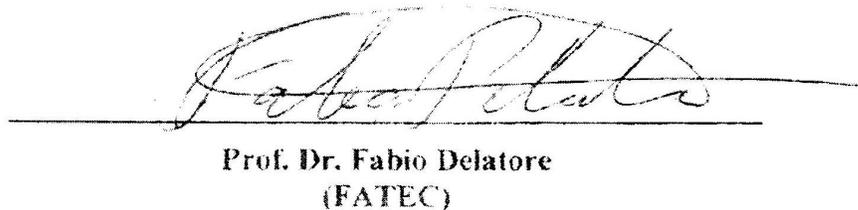
Data da defesa: 29-02-2012

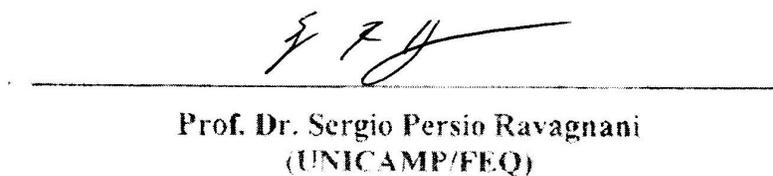
Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

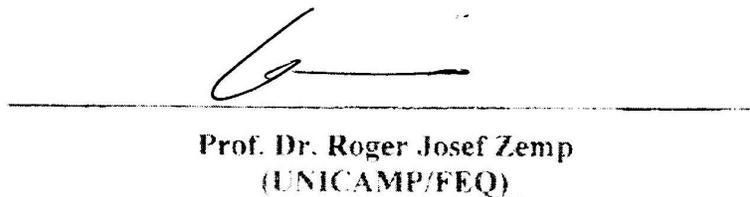
Tese de Doutorado defendida por Elisângela Orlandi de Sousa Gonçalves e aprovada em 29/02/2012 pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:


Prof. Dr.ª Sandra Lúcia da Cruz
(UNICAMP/FEQ)

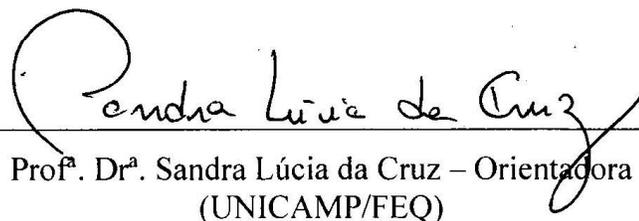

Prof.ª Dr.ª Christianne Elisabete da Costa Rodrigues
(FZEA/USP)


Prof. Dr. Fabio Delatore
(FATEC)


Prof. Dr. Sergio Persio Ravagnani
(UNICAMP/FEQ)


Prof. Dr. Roger Josef Zemp
(UNICAMP/FEQ)

Este exemplar corresponde à Tese de Doutorado em Engenharia Química, apresentada por Elisângela Orlandi de Sousa Gonçalves, em 29/02/2012.



Prof.^a. Dr.^a. Sandra Lúcia da Cruz – Orientadora
(UNICAMP/FEQ)

Dedico este trabalho ao meu esposo Tiago pelo amor e confiança, ao meu irmão Luiz Gustavo e meus pais Hélia e Aparecido (*in memoriam*) pelo apoio e incentivo.

*“Não seja escravo do seu passado.
Mergulhe em mares grandiosos, vá bem fundo
e nade bem longe, e voltarás com respeito por
si mesmo, com um novo vigor, com uma
experiência a mais, que explicará e superará a
anterior.”*

Ralph Waldo Emerson

AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo, por estar sempre presente em minha vida permitindo viver e assim realizar tudo que conquistei. Muito obrigada por minha saúde e iluminar meus caminhos.

Aos meus pais Aparecido de Sousa (*in memoriam*) e Hélia Orlandi de Sousa e ao meu irmão Luiz Gustavo Orlandi de Sousa, pelos constantes incentivos na busca de meus objetivos profissionais. Obrigada por me ajudarem em minha formação educacional, um dos bens mais preciosos que carrego em minha vida.

Ao meu esposo Tiago Pereira Gonçalves, pela compreensão, companheirismo e incentivo em todos os momentos. Obrigada por tornar minha vida mais especial e me fazer sentir uma pessoa capaz de enfrentar as dificuldades.

A todos meus tios, tias, primos e primas, que mesmo distante me acompanharam e me apoiaram nesta longa caminhada. Obrigada por torcerem sempre para o meu sucesso.

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

À professora Ana Maria Frattini Fileti pela grande co-orientação, dedicação e principalmente pela confiança.

Ao professor José Vicente Hallak d'Angelo pela orientação do Estágio de Capacitação Docente, realizado no ano de 2008, em paralelo à tese de doutorado.

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

Aos meus colegas de laboratório pelas contribuições, além de compartilhar momentos de descontração e de dificuldades.

Aos novos amigos que encontrei no DESQ pela amizade e companheirismo.

À Rejane, em especial, pela grande força e apoio na fase final da minha pesquisa.

À minha sogra Ana Maria, por suas orações e minhas cunhadas Juliana (*in memorian*), Viviana e Mariana pela amizade e apoio.

Às minhas queridas amigas Danielle, Fabiana, Graziella, Márcia, Mariana, Maristela e Sueli que mesmo longe, sempre estiveram presentes na minha vida me apoiando e me incentivando.

Aos novos amigos Gustavo, Miriam, Ísis, Carol, Joice, Paulo, Elias, Yonara, Sônia, Sidinei, Vera e José Eufrazio, que sempre estiveram na torcida por mim nesta caminhada.

Ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

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

RESUMO

Sousa, E. O. G. *Detecção e Localização de Vazamentos em Tubulações Utilizando Sistemas Acústicos e Redes Neurais*. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2012. Tese (doutorado).

Redes de tubulação são conhecidas como sistemas complexos de dutos desde a antiguidade e são utilizadas no transporte de líquidos e gases 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 rastrear estes tipos de vazamentos, este trabalho tem como objetivo propor metodologias para a detecção de vazamentos em uma tubulação, de natureza rígida ou flexível, baseando-se no método acústico e na análise de transientes de pressão gerados a partir do vazamento, visando à localização e a determinação da magnitude dos vazamentos através da utilização de redes neurais artificiais. As metodologias propostas se destacam por não apresentarem impactos prejudiciais ao meio ambiente. Variações de transientes de pressão e o ruído sonoro gerados pela ocorrência de vazamentos foram detectados e analisados a partir de experimentos realizados em uma tubulação de ferro galvanizado de 60 m e uma tubulação flexível de 100 m de comprimento operando com escoamento contínuo de gás (ar), em várias condições de operação. O vazamento foi provocado em mais que uma posição ao longo das duas tubulações e utilizaram-se orifícios de diâmetros diferentes. Os transientes de pressão e os ruídos sonoros foram captados por um transdutor de pressão e um microfone, respectivamente, ambos instalados em um vaso de pressão, localizado no início da tubulação e acoplados a uma placa de aquisição de dados em um microcomputador. 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 dados resultantes dos experimentos mostraram que foi possível detectar vazamentos, para todos os orifícios utilizados, baseado nos transientes de pressão e no método acústico. A dinâmica desses dados foi utilizada

como entrada para o modelo neural para localizar e determinar a magnitude dos vazamentos, simultaneamente. O método de Levenberg-Marquardt com Regularização Bayesiana foi utilizado no treinamento dos modelos neurais. Os resultados apresentados pelo modelo neural desenvolvido indicaram com sucesso ao mesmo tempo a localização e a magnitude dos vazamentos.

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

ABSTRACT

Sousa, E. O. G. Leak Detection and Location in Pipelines Through Acoustic Method and Neural Networks. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2012. Tese (doutorado).

Pipeline networks are complex systems of ducts used nowadays for gas and chemical products transporting through long distances. They frequently cross highly populated regions, water supplies or natural reserves. Even small leaks in pipelines can lead to great losses of products and serious damages to the environment before it could be detected. With the purpose to track these leaks, this work developed a technique to detection of leaks in pipelines, of rigid or flexible nature, based on acoustic method and on analysis of pressure transients generated by leak occurrence, in order to localization and determination the magnitude of leaks by using neural artificial networks. The methodologies proposed are notated for not having impacts on the environment. Variations of pressure transients and the noise generated by leakage will be detected and analyzed in a 60m-galvanized iron pipe and in a 100m-flexible pipe operating with continuous flow of gas (air) under various operating conditions. Leakages were provoked in many positions along the two pipes and used hole of distinct magnitudes. The pressure transients and the audible noise was captured by the pressure transducer and the microphone, respective, both installed inside the pressure vessel connected to a data acquisition system at a computer. 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, for all holes, based on a pressure transient and on acoustic methods. The dynamics of these data in time is used as input to the neural model to location and determine of the leaks magnitude, simultaneously. The method chosen for training the neural networks was the Levenberg-Marquardt with Bayesian

Regularization. The results of neural models indicated successfully in the same time the location and the magnitude of the leaks.

Keywords: leak detection, acoustic method, pipeline networks, neural model.

SUMÁRIO

RESUMO	XIII
ABSTRACT	XV
SUMÁRIO.....	XVII
LISTA DE FIGURAS	XXI
LISTA DE TABELAS	XXIII
NOMENCLATURA.....	XXV
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Objetivos.....	3
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 - Introdução.....	5
2.2 – Principais Métodos Utilizados para Detecção de Vazamentos.....	6
2.2.1 – Detecção de Vazamentos Baseados em Sensores Acústicos	10
2.2.2 – Detecção de Vazamentos Utilizando Redes Neurais Artificiais.....	12
2.3 – Detecção de Vazamentos por Computador On-Line	15
2.4 – Conclusão.....	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1 - Sistema Experimental.....	23
3.1.1 – Especificação dos Equipamentos	26
3.1.2 – Sistema de Aquisição de Dados	27
3.2 – Procedimento Experimental.....	32
3.2.1 – Monitoramento do Sistema Durante a Realização dos Experimentos	33
3.3 – Redes Neurais Artificiais (RNA'S)	34

3.3.1 - Definição.....	34
3.3.2 – Estrutura da RNA.....	34
3.3.3 – Topologia da RNA.....	36
3.3.4 – Treinamento da RNA.....	37
3.4 – Uso das Redes Neurais para Determinar Magnitude e Localização do Vazamento.	39
3.4.1 – Treinamento e Arquitetura da Rede Neural.....	39
3.4.2 – Organização dos Dados para o Treinamento.....	43
3.5 – Cálculo da Porcentagem de Vazamento Através do Orifício de Vazamento.....	45
4 . RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 – Monitoramento dos Vazamentos Através do Transdutor De pressão e do Microfone	49
4.1.1 – Tubulação Rígida.....	49
4.1.2 – Tubulação Flexível.....	54
4.2 – Uso das Redes Neurais para Localização e Determinação da Magnitude do Vazamento.....	61
4.2.1 – Tubulação Rígida.....	62
4.2.2 – Tubulação Flexível.....	69
5 . CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	75
5.1 Conclusões.....	75
5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	77
6 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
APÊNDICE A – PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA AQUISIÇÃO ON-LINE DOS DADOS PROVENIENTES DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO E DO MICROFONE. .	85

APÊNDICE B – PROGRAMA DE TREINAMENTO DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS NO SOFTWARE MATLAB 7.0.....	97
APÊNDICE C – TRANSIENTES DE PRESSÃO E AMPLITUDE DO RUÍDO SONORO.	99
APÊNDICE D – CÁLCULO DA MÉDIA MÓVEL E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS PARA TREINAMENTO.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Sistema experimental operando com tubulação rígida.....	24
Figura 3.2 – Sistema experimental operando com tubulação flexível.....	24
Figura 3.3 – Vaso de Pressão.....	25
Figura 3.4 – Tubulação ferro galvanizado.....	25
Figura 3.5 – Microcomputador em funcionamento.....	25
Figura 3.6 – Esquema simplificado de uma estrutura de um modelo neural.....	35
Figura 3.7 – Ilustração estrutural do modelo neural.....	42
Figura 4.1 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro na tubulação rígida. (SOUSA, 2007).....	50
Figura 4.2 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro. $P_0 = 6,0 \text{ kgf/cm}^2$	53
Figura 4.3 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro Tubulação Flexível.	54
Figura 4.4 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro. $P_0 = 2,0 \text{ kgf/cm}^2$	57
Figura 4.5 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro. $P_0 = 4,0 \text{ kgf/cm}^2$	58
Figura 4.6 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro. $P_0 = 6,0 \text{ kgf/cm}^2$	59
Figura 4.7 – Transiente de pressão, variação da amplitude do ruído sonoro e média móvel.	62
Figura 4.8 – Diferença entre dados reais e dados calculados pelos modelos neurais versus o número de vetores utilizando tubulação rígida	64
Figura 4.9 – Transiente de pressão, variação da amplitude do ruído sonoro e média móvel.	66
Figura 4.10 – Diferença entre dados reais e dados calculados pelos modelos neurais versus o número de vetores de dados teste para a pressão inicial de $6,0 \text{ kgf/cm}^2$, utilizando tubulação rígida.....	67

Figura 4.11 – Transiente de pressão, variação da amplitude do ruído sonoro e média móvel.	69
Figura 4.12 – Diferença entre dados reais e dados calculados pelos modelos neurais versus o número de vetores de dados teste para a pressão inicial de 2,0 kgf/cm ²	71
Figura 4.13 - Diferença entre dados reais e dados calculados pelos modelos neurais versus o número de vetores de dados teste para a pressão inicial de 4,0 kgf/cm ²	72
Figura 4.14 - Diferença entre dados reais e dados calculados pelos modelos neurais versus o número de vetores de dados teste para a pressão inicial de 6,0 kgf/cm ²	72
Figura C.1 – Transiente de pressão e amplitude do ruído sonoro. Pressão inicial de 2,0 kgf/cm ²	101
Figura C.2 – Transiente de pressão e amplitude do ruído sonoro. Pressão inicial de 3,0 kgf/cm ²	102
Figura C.3 – Transiente de pressão e amplitude do ruído sonoro. Pressão inicial de 4,0 kgf/cm ²	103
Figura C.4 – Transiente de pressão e amplitude do ruído sonoro. Pressão inicial de 5,0 kgf/cm ²	104
Figura C.5 – Transiente de pressão e amplitude do ruído sonoro. Pressão inicial de 6,0 kgf/cm ²	105
Figura D.1 – Cálculo da Média Móvel.	107
Figura D.2 –Organização dos dados de entrada e saída para o treinamento do modelo neural.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 –Condições Experimentais.	33
Tabela 3.2 – Cálculo da média móvel realizado com os dados originais das 3 frequências.	41
Tabela 3.3 – Organização das variáveis de entrada e saída no arquivo de dados para o treinamento do modelo neural.	44
Tabela 4.1 – Situações Experimentais para a Tubulação Rígida. (SOUSA, 2007).....	49
Tabela 4.2 – Situações Experimentais para a Tubulação Flexível.	55
Tabela 4.3 – Cálculo da porcentagem de vazamento na Tubulação Flexível.....	61
Tabela 4.4 – Configuração da RNA escolhida para a Tubulação Rígida.	63
Tabela 4.5 – Maiores erros obtidos dos modelos neurais para determinar o tamanho do vazamento.	65
Tabela 4.6 – Configuração da RNA escolhida para a Tubulação Rígida.	66
Tabela 4.7 – Maiores erros obtidos dos modelos neurais para determinar o tamanho e a localização do vazamento.	68
Tabela 4.8 – Configurações das RNAs escolhidas para cada pressão na Tubulação Flexível.	70
Tabela 4.9 – Erros obtidos dos modelos neurais para determinar o tamanho do vazamento e sua localização na tubulação flexível a pressão de 2,0 kgf/cm ²	73
Tabela 4.10 – Erros obtidos dos modelos neurais para determinar o tamanho do vazamento e sua localização na tubulação flexível a pressão de 4,0 kgf/cm ²	73
Tabela 4.11 – Erros obtidos dos modelos neurais para determinar o tamanho do vazamento e sua localização na tubulação flexível a pressão de 6,0 kgf/cm ²	74

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A	amplitude do filtro analógico (Volts)
A	área da seção transversal do tubo (m^2)
A_{or}	Área do orifício de vazamento (m^2)
C'	coeficiente de fluxo para o orifício
C_d	o coeficiente de descarga do orifício
D	diâmetro do tubo (m)
f	fator de atrito (adimensional)
k	rugosidade equivalente da parede do tubo (m)
L	comprimento do tubo (m)
L_1	distância entre os transdutores 1 e 2 (m)
L_2	distância entre os transdutores 2 e 3 (m)
L_3	distância entre os transdutores 3 e 4 (m)
P	Pressão no interior do sistema vaso de pressão – tubulação (kgf/cm^2)
Q	vazão do fluido no interior do tubo (kg/s)
t_1	tempo de detecção do transdutor T1
t_2	tempo de detecção do transdutor T2
t_3	tempo de detecção do transdutor T3
t_4	tempo de detecção do transdutor T4
v	velocidade do fluido (m/s)
Y	distância do vazamento ao transdutor a jusante (m)
Y	fator de expansão

Letras Gregas

α	Parâmetro da função objetivo
β	Parâmetro da função objetivo
β	razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro interno
Δ	Variação da condição
ρ	densidade volumétrica do fluido (kg/m^3)
ρ	massa específica do ar (kg/m^3)

Abreviaturas e Siglas

ADA	Analógico-Digital-Analógico
b	Bias adicionado aos neurônios
CAD	Conversor Analógico-Digital
CDA	Conversor Digital-Analógico
desn	valor desnormalizado da rede neural
E	Vetor dos dados de entrada da variável de entrada i
F	Função Objetivo
k	Instante atual
k-1	Instante anterior a k
k-2	Instante anterior a k-1
k-3	Instante anterior a k-2
max	o valor máximo de cada variável para o cálculo da rede neural
min	o valor mínimo de cada variável para o cálculo da rede neural
MLP	Rede de múltiplas camadas
MSE	Erro médio quadrado

ND Número decimal

ND_{eq} Número decimal equivalente à tensão de entrada

norm valor normalizado para o cálculo da rede neural

PRODUT Programa Tecnológico de Dutos

Re Número de Reynolds

RNA Redes neurais artificiais

S Sinal de frequência do microfone

SA Tensão de entrada

SCADA Supervisory Control and Data Acquisition

SD Sinal Digital

SSE Somatório dos erros quadrados

SSW Somatório do quadrado dos pesos e bias

T1 Transdutor 1

T2 Transdutor 2

T3 Transdutor 3

T4 Transdutor 4

1 – INTRODUÇÃO

Redes de tubulações são compostas por dutos fixos ou móveis que podem ser de superfície subterrânea ou submarina e são construídas em todo o mundo para realizar o transporte de diferentes tipos de produtos de refinarias, campos de petróleo e bases de distribuição.

Os primeiros oleodutos para o transporte de petróleo e derivados foram construídos entre 1875 e 1880 na Pensilvânia – EUA. Os gasodutos com fins comerciais entraram em operação em 1821. No século XX, ampliaram-se as redes de dutos em diversas regiões do mundo, especialmente naquelas que são grandes produtoras de petróleo, como o Oriente Médio e a antiga União Soviética, ou grandes consumidoras, como a Europa.

No Brasil, os primeiros oleodutos construídos ligaram ao escoamento as fontes de produção dos campos de Itaparica e Joanes, na Bahia, em 1942. Nos anos quarenta iniciou-se também a construção do oleoduto Santos – São Paulo, concluído somente em 1951. E apenas na década de 80 houve a construção de grande número de gasodutos, consequência do aumento da utilização do gás natural nas indústrias (SANT’ANA, 2006).

A previsão da PETROBRAS (2008), é que o consumo interno de gás passará dos atuais 46,3 milhões de metros cúbicos diários para 134 milhões em 2012. Parte do aumento virá do gás natural liquefeito (GNL), mas o maior volume resultará do aumento na produção. O gasoduto está sendo licitado pela estatal em conjunto com os 22 km que serão instalados junto à planta de regaseificação que será instalada em Pecém no Ceará. A Petrobras estuda a possibilidade de vir a implementar no Brasil até seis unidades de regaseificação de Gás Natural Liquefeito (GNL) no longo prazo, para atender ao crescimento da demanda pelo combustível e manter maior índice de segurança no abastecimento das usinas térmicas.

Ao longo do tempo, os dutos podem sofrer processos de degradação provocados por diversos fatores como corrosão, impactos e defeitos de fabricação, criando a possibilidade de ocorrência de vazamentos. Atualmente diferentes sistemas de detecção de vazamento têm sido estudados para o desenvolvimento de novas tecnologias para a atividade dutoviária em todo o mundo visando melhoria dos níveis de segurança, confiança, eficiência e efetividade de operação.

Além da detecção da ocorrência do vazamento, é de extrema importância a detecção do local do vazamento em sistemas de supervisão e controle em tubulações, pois quando ocorre um vazamento em uma tubulação, a mesma precisa ser rapidamente reparada para que se minimizem riscos associados a possíveis acidentes, danos pessoais, ambientais, sociais e perdas de materiais.

Para identificar os vazamentos e minimizar os prejuízos, a Indústria Nacional de Petróleo utiliza duas grandes famílias de detecção: os sistemas de balanço de massa (volume compensado) e a tecnologia baseada em ondas acústicas. Quando acontece uma ruptura na parede da tubulação, o transiente pode ser detectado por sinal de pressão do escoamento e por vibrações através da tubulação. A tecnologia capta o ruído existente dentro do duto e procura a assinatura característica de um ruído de vazamento que é diferente dos demais sons que existem na tubulação – onde estão instalados sensores acústicos de alta precisão em pontos estratégicos. A diferença de pressão causada quando o duto é rompido se transforma em um ruído que viaja pelo fluido e pelo duto nas duas direções. Os sensores captam o som e passam a informação para unidades eletrônicas, que filtram esse sinal em busca da assinatura característica. Assim que a assinatura é encontrada, a informação, por meio de um sistema de comunicação, é enviada para uma sala de controle, onde existe uma unidade mestre do sistema que tem uma visão geral de todas as remotas e sensores instalados no duto. (VALPEIRO, 2011).

As tubulações flexíveis são muito utilizadas em solos marinhos, pois sua versatilidade e sua capacidade de evoluir com a indústria continua a assegurar seu lugar em novos desenvolvimentos no campo de exploração de gás natural e petróleo. Possui grande resistência a corrosão e a altas pressões, possui baixo efeito de incrustação e baixa rugosidade. Caracterizado por sua excelente soldabilidade e atoxidade, as tubulações

flexíveis são de fácil manuseio e instalação. Sua principal vantagem é a de que, quando curvadas, não apresentam perda diametral, ou seja, apresenta flexibilidade, modularidade e versatilidade de reutilização. (TECHNIP, 2009).

Segundo a PETROBRAS (2011), no ano 2000 mais de 70% da produção nacional de petróleo era obtida a partir de poços situados em águas profundas, devendo-se utilizar plantas de processo com base em sistemas flutuantes de produção. O sucesso desta concepção se deve principalmente à utilização de dutos flexíveis capazes de acompanhar seus grandes deslocamentos. Outra vantagem da utilização de dutos flexíveis sobre dutos rígidos de aço é a simplificação das operações de transporte e instalação, pela pré-fabricação destes dutos em comprimentos longos e armazenagem em carretéis. Entretanto, apesar da crescente utilização de dutos flexíveis em águas profundas, sua análise de colapso local, nestes últimos anos, recebeu menos atenção do que a análise global. Torna-se, portanto, necessária a avaliação dos métodos analíticos e numéricos existentes, bem como o desenvolvimento de formulações mais consistentes para que se possam prever as cargas de colapso local destas estruturas

1.1 – Objetivos

Preocupações ambientais cada vez maiores nas sociedades modernas, crescentes necessidades energéticas e elevados custos dos transportes convencionais, levaram a uma maior aposta em novas formas de transporte, quer por gasoduto ou oleoduto. Juntamente com esta forma de transporte vem a preocupação em monitorar os gasodutos e oleodutos através dos sistemas de detecção e localização de vazamentos para que o produto alcance seu consumidor com uma maior efetividade.

O tempo de detecção é fundamental em caso de vazamento. Esse é o grande diferencial do emprego da tecnologia acústica para detecção de vazamento. Os sensores acústicos agem como “microfones”, “ouvindo” as ondas de som originadas de eventuais vazamentos, que possuem características distintas dos “ruídos do processo”. E, além disso, a tecnologia acústica mede o tempo de viagem da onda de som do local do vazamento até os sensores acústicos adjacentes, permitindo a localização do vazamento com precisão de metros.

1 – Introdução

Portanto o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e teste de uma técnica de vazamentos de gás, baseada na análise da amplitude do ruído sonoro e do transiente de pressão gerados por vazamentos em uma tubulação e ou mangueira transportando gás visando à detecção, a localização e a determinação da magnitude dos vazamentos, através da utilização de redes neurais artificiais.

Este trabalho constituiu de testes realizados em laboratórios e as características da amplitude do ruído sonoro e do transiente de pressão gerados pela ocorrência de vazamento foram analisadas para diversas condições de operação: pressão interna do sistema de tubulação/mangueira; magnitude e localização do vazamento. Os dados do ruído sonoro e do transiente de pressão obtidos experimentalmente foram utilizados como dados de entrada do modelo neural para determinar a ocorrência, a magnitude e a localização dos vazamentos.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Introdução

Redes de tubulações são sistemas complexos de dutos utilizados no transporte de diferentes produtos químicos, líquidos ou gases, por longas distâncias. São sistemas bastante eficientes, mas sujeitos a uma grande quantidade de fatores que podem afetar a integridade desses sistemas e provocar vazamentos (SANTOS, 2011).

Os vazamentos podem ser gerados por diversos fatores como causas naturais, ação de terceiros, falhas operacionais, falhas mecânicas e de manutenção. Deste modo, o monitoramento permanente das condições operacionais das redes de tubulações é de extrema importância para que vazamentos possam ser identificados e localizados o mais rápido possível. Conforme BAGHDADI (1988) os vazamentos de pequenas proporções (< 5 L/h) são os mais difíceis de serem detectados, portanto são bastante perigosos porque podem provocar grandes perdas de produto até serem detectados.

O desenvolvimento de técnicas de detecção de vazamentos em redes de tubulações faz-se, portanto, necessário para garantir um maior nível de segurança social e ambiental. Através destas técnicas, vazamentos podem ser detectados de imediato por apresentarem variações nos limites de operação. Porém muitas técnicas não apresentam desempenho satisfatório, pois geram alarmes falsos, manutenções caras e alguns sistemas são de difícil entendimento ao operador.

Neste capítulo são expostas algumas técnicas citadas na literatura sobre os diversos métodos de detecção e localização de vazamentos em tubulações. Mais detalhadamente são apresentados alguns trabalhos utilizando métodos acústicos para detectar vazamentos em tubulações e a utilização de redes neurais artificiais como ferramenta de trabalho.

2.2 – Principais métodos utilizados para detecção de vazamentos.

Durante as últimas décadas, grandes redes de tubulações foram construídas de forma a transportar produtos petrolíferos desde a sua produção até os locais de consumo. Monitoramentos e supervisões de tais dutos é o tema de maior importância para evitar a liberação não intencional destes fluidos ao longo do duto, caracterizada como vazamento (KHULIEF e EMARA-SHABAIK, 2006). Um vazamento em um sistema de tubulação de gás é um problema grave não só a partir de um ponto de vista de segurança e ambientais, mas também da perda de energia que afeta a economia de um país. Assim, é importante detectar o ponto de vazamento e identificar a causa do mesmo (KIM e LEE, 2009).

A utilização de técnicas para a detecção de vazamentos não é recente. BLACK (1992) classificou as principais técnicas para detecção de vazamentos em tubulações sob os seguintes grupos: (a) observação, (b) métodos baseados em sensores, (c) dispositivos para inspeção de dutos, “pigs” inteligentes, (d) análise a partir de medidas de pressão, (e) balanço de volume, (f) detecção baseada na modelagem matemática da tubulação.

O método de observação é o método mais simples de detectar vazamentos, fazendo a inspeção visual regular ao longo da tubulação com o objetivo de localizar condições anormais de operação, odores e sons que podem ocorrer devido a vazamentos. Este método não é tão eficaz e depende muito da experiência das pessoas envolvidas.

A análise a partir de medidas 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. O vazamento pode provocar uma queda de pressão causando uma diminuição no gradiente médio (WIKE, 1996).

O sistema de detecção por medidas de pressões negativas mostra um bom desempenho na detecção de vazamentos na ordem de 5% da taxa do fluxo do líquido nominal. 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. 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).

O método de detecção de vazamento utilizando o balanço de volume é muito utilizado, 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 previstas 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).

Os dispositivos para inspeção de dutos, “pigs” (pipeline inspection gauge) são o método de inspeção mais utilizado internacionalmente, pois são introduzidos no início da tubulação e com a pressão produzida pelo bombeio do produto percorrem toda a extensão da tubulação, podendo atingir centenas de quilômetros. Os “pigs” são compostos por componentes eletrônicos, mecânicos e sensores baseados em magnetismo, ultra-som e deformação mecânica. Diferentes tipos de “pigs” instrumentados foram desenvolvidos, cada um realizando um tipo de inspeção. Os geométricos são sensíveis a variações de diâmetro, localizam defeitos como amassamentos e ovalizações. Já os magnéticos e os de ultra-som detectam perdas de espessura por corrosão, tanto internas como externas. Todos funcionam com grande eficiência e precisão, porém não são capazes de localizar pequenos vazamentos (CAMERINI, 2004).

Embora existam diferentes formulações, a essência da maioria dos sistemas de modelagem matemática 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 matemático 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).

Os 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).

VERDE et al. (2007) apresentaram um método para a identificação de dois vazamentos em uma tubulação pressurizada, quando o fluido apresentava comportamento estático e transiente. Foi utilizada uma tubulação de ferro galvanizado com 132,56 m de comprimento, 0,105 m de diâmetro e 4,7 mm de espessura. Dois sensores ultra-sônicos foram instalados nas extremidades da tubulação com o objetivo de medir o comportamento dos fluxos tanto no estado estático, como no estado transiente. As medidas de pressão foram feitas através de um transmissor de pressão e os sinais ultra-sônicos foram medidos utilizando um sistema de aquisição de dados com uma frequência de 100 hertz. Os resultados mostraram que para detectar vazamentos múltiplos no estado estático do fluido, o teste com um modelo dinâmico é complementamente necessário para reduzir o intervalo de tempo gasto na identificação dos vazamentos.

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 et al. (1989) desenvolveram um sistema de sensor de hidrocarboneto que consiste em um módulo de alarme e um cabo sensor. O cabo é instalado ao longo da tubulação e 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 é compatível 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 (CARRILLO et al, 2002).

QU et al. (2010) apresentaram a técnica de detecção e localização de vazamento em tubulação utilizando sensores ópticos. Neste sistema o sensor de vibração é constituído por um cabo óptico, colocado em paralelo com o duto na mesma vala e três fibras ópticas monomodo são localizadas no interior do duto. O sensor é baseado em interferômetro de fibra óptica, Mach-Zehnder e pode detectar os sinais de vibração ao longo de um oleoduto em tempo real. O sistema consistiu em quatro linhas com uma extensão total de cerca de 150 km. O sistema pode reconhecer vazamentos ao longo do duto com uma taxa de um bom reconhecimento (normalmente > 95%) em tempo real e localizar com boa precisão (normalmente ± 200 m). A detecção de vazamento do duto e o sistema de pré-alerta é

seguro e confiável. O desempenho do sistema não será afetado pela propriedade do material transportado no duto.

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.

2.2.1 – Detecção de Vazamentos Baseados em Sensores Acústicos

Vazamento de gases em sistemas de tubulações é um problema sério não só do ponto de vista de segurança ambiental, mas também da perda de energia que afeta a economia de um país. Assim, é importante detectar e identificar o local do vazamento. Em geral a causa do vazamento em uma tubulação é devido a forças de impacto de equipamentos de construção. O vazamento, devido à força do impacto, induz uma onda acústica no interior do duto ao se propagar ao longo do duto. Portanto, a análise correta dessa onda acústica se torna uma das soluções para obter informações úteis sobre a localização dos vazamentos (KIM and LEE, 2009).

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 (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 permitiu 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 significou a existência de vazamento. A localização do vazamento foi 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.

SHIMANSKIY et al. (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.

A detecção de vazamentos de água em tubulações submersas de distribuição que utilizam métodos acústicos é prática comum em muitos países. As técnicas são usadas extensamente na detecção de vazamentos em tubulações metálicas. Entretanto, um número de dificuldades foi destacado ao tentar determinar a localização de vazamentos de água, utilizando o método acústico em tubulações flexíveis (de plásticos) enterradas no solo ou submersas em uma extensão de água, como por exemplo, um rio ou um lago. A energia acústica gerada por um vazamento de água em uma tubulação submersa propaga frequências relativamente baixas, em torno de 100 Hz, sugerindo que nenhum sinal de ruído de vazamento seria detectável em nenhum ponto da tubulação submersa. Contudo, 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 (MUGGLETON et al., 2004).

MOROZOV et al. (2007) descreveram o primeiro sistema acústico doméstico de multi-canal automatizados com o objetivo de monitorar vazamentos, chamado SAKT. O sistema SAKT é baseado em componentes modernos, desempenha funções importantes, tais como monitoramento e detecção de vazamento, determinação da localização e do tamanho do vazamento. O sistema se destina a detecção de vazamento de líquido em uma usina nuclear operando em diferentes níveis de potência em regimes normais de funcionamento. Os vazamentos foram simulados em uma tubulação de aço n ° 20, 351

milímetros de diâmetro, com uma parede de 36 milímetros de espessura e 10 m de comprimento. O fluido utilizado foi a água com temperatura de 320°C e sob pressão 16 MPa. A tubulação foi mantida à temperatura de trabalho usando os calefatos elétricos especiais. Os testes foram realizados com taxas de fluxo de refrigerante variando de 0,5 a 9,5 litros/min. Três sensores acústicos, que transmitem sinais a uma distância de 200 m, foram colocados na tubulação. Isso elimina a necessidade de colocação de dispositivos eletrônicos no escudo protetor, o que aumenta a confiabilidade operacional do sistema. No entanto, os resultados da operação experimentais têm demonstrado que o diagnóstico algoritmo incorporado SAKT deve ser melhorado, sendo necessário filtrar o ruído de fundo.

YANG et al. (2008) desenvolveram um novo método de localização de vazamento em uma tubulação transportando água sem o conhecimento do comprimento da tubulação. O método utilizado é baseado nas inspeções dos sinais acústicos, que são adquiridos através de hidrofones. O pré-requisito para a detecção do vazamento é que se conheça a distância exata entre os dois sensores colocados em pontos quaisquer da tubulação. Os sinais acústicos são gerados pela fricção e pelas cavitações do vazamento do fluido. Os resultados experimentais mostraram que os hidrofones identificaram as variações dos sinais acústicos provocados pelo vazamento e que foi possível calcular o tempo gasto para que os hidrofones identificassem a ocorrência de vazamento.

2.2.2 – Detecção de Vazamentos utilizando Redes Neurais Artificiais.

ZHONG et al. (1997) utilizaram Redes Neurais Artificiais (RNA) para detectar vazamentos em tubulações de caldeiras. A RNA utilizada no experimento foi a Back Propagation (rede com múltiplas camadas) tinha a função de compreender o mapa funcional entre o vazamento e as variáveis do processo que exibiam mudanças significativas quando ocorria o vazamento. A rede neural era composta por uma camada de entrada e uma de saída e duas camadas intermediárias. Foram realizados dois testes para analisar o desempenho da proposta. No primeiro teste foram usados dados de simulação, enquanto que no segundo foram usados dados experimentais. No primeiro teste, diferentes vazamentos foram simulados em diferentes locais da tubulação. As variáveis sensíveis para cada cenário de vazamento do duto foram introduzidas no sistema e a saída da rede

forneceu a taxa de vazamento dos casos particulares de vazamento. Para os dados experimentais, as informações das variáveis sensíveis continham informações do momento em que houve o vazamento e durante o desligamento do mesmo. De acordo com os resultados foi possível a identificação do vazamento.

BELSITO et al. (1998) simularam 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 obtidos para o 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 consequentemente gerando dados que constituiriam padrões de operação. O banco de dados consiste em vazões de entrada e saída da tubulação, como também as pressões do fluido em 13 pontos diferentes ao longo da tubulação, constituindo um “padrão”. Neste trabalho foi utilizada uma tubulação de referência transportando amônia liquefeita. O modelo numérico desenvolvido foi baseado em equações de conservação de massa, momento e energia, as quais foram resolvidas utilizando diferenças finitas. Foram utilizadas duas redes neurais diferentes, uma para detectar o vazamento e o tamanho do vazamento e outra para localizá-lo. O primeiro sistema seria para trabalhar em tempo real para monitorar a tubulação e dando alarme se o vazamento for detectado, deste modo ativando o segundo sistema, que faz a possível localização ao longo do vazamento na linha. Para o treinamento da rede, foram utilizados dados com e sem vazamento para determinar o tamanho do vazamento e apenas dados com vazamentos para determinar a localização do vazamento. No sistema em estudo foram detectados vazamentos muitos menores que 1% da vazão do fluxo de entrada. A localização de vazamentos grandes foi predita com muita precisão, mesmo quando sinais de ruído foram utilizados.

CAPUTO e PELAGAGGE (2002) propuseram um trabalho para avaliar as condições de pressão e taxa de fluxo de uma rede de tubulação, por meio de simulação, com o objetivo de prever o estado da rede da tubulação em situações normais e anormais de fluxo para gerar um conjunto de dados para treinar uma Rede Neural Artificial. Através de um modelo matemático, foram gerados dados de pressão e taxa de fluxo em diferentes

condições de funcionamento com ou sem vazamentos. A rede de múltiplas camadas (MLP) foi selecionada como o tipo de rede neural mais susceptível para representar esta aplicação. Duas arquiteturas de RNA foram apresentadas, na qual a primeira RNA determina o trecho onde ocorre o vazamento e a segunda RNA foi ativada especificamente em seguida para estimar com precisão a magnitude e localização do vazamento no trecho selecionado. A arquitetura proposta foi satisfatoriamente testada em um caso simplificado, obtendo resultados promissores.

Dando continuidade ao trabalho, CAPUTO e PELAGAGGE (2003), realizaram o treinamento da rede neural com o conjunto de dados obtido através do modelo matemático desenvolvido no trabalho anterior. Este conjunto de dados contém dados de pressão e taxa de fluxo em diferentes condições de funcionamento com ou sem vazamentos. Desta forma, uma forte correlação entre os efeitos de vazamento, quantidade e localização foram definidos. Durante a fase de execução, as RNAs agiram como um classificador para estimar o estado do sistema atual e identificar vazamentos com base em informações disponíveis. Após a metodologia proposta ser realizada, a técnica foi aplicada a uma situação real. Foi utilizada uma tubulação de 9455 m de extensão e os resultados obtidos também foram promissores. O trecho em que o vazamento ocorreu foi corretamente identificado, a taxa de fluxo apresentou um erro inferior a 3% e a localização do vazamento foi determinada com uma precisão de 50 a 100 m.

GARCIA et al. (2010) utilizaram redes neurais artificiais para detectar vazamentos de ar comprimido em uma seção de duto com 2 m de comprimento e 10 cm de diâmetro interno, com espessura da parede de 5,7 mm. Durante a realização dos experimentos, o duto se encontrou suspenso para um maior isolamento, evitando assim vibrações externas. O treinamento do modelo neural foi realizado através de sinais vibroacústicos captados por um acelerômetro piezoelétrico. O algoritmo de otimização para o treinamento foi o de Levenberg-Marquardt, que permitiu uma rápida convergência de treinamento para a RNA. Através dos resultados obtidos, pôde-se detectar 98 % dos casos de vazamento e 99 % das outras situações com geração de vibrações, mas sem vazamento.

2.3 – 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 $\frac{3}{4}$ " 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).

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.

BUIATTI (1995) desenvolveu um método computacional de análise de transientes hidráulicos em uma tubulação de 427 m de comprimento, ¾” 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.

BUIATTI (1995) determinou também a velocidade de propagação da onda de pressão. Os resultados mostraram que a velocidade diminuiu 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.

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 a 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 ¾” 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.

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.

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.

De um modo geral, os resultados apresentados mostraram que o gás escoando na tubulação absorveu grande parte do impacto causado pela onda de pressão, quando da ocorrência de vazamento, e também que existiu 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:

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.

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.

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. Foi verificado 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 à queda de pressão.

(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. A pressão na tubulação só recuperou rapidamente seu valor inicial apenas quando a válvula de vazamento era fechada logo após a sua abertura.

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 1kHz, 5 kHz e 9 kHz.

Foram detectados vazamentos de gás no vaso de pressão para o vaso de pressão operando com e sem alimentação contínua de ar. 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 significativa.

SOUSA (2007) aplicou 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 ligada a um vaso de pressão, operando sem e com escoamento de gás em várias condições de operação. O fluido de trabalho utilizado foi o ar comprimido. Os experimentos foram realizados em uma tubulação de 60 metros e ½” de diâmetro e um vaso de pressão de 34,5 litros. Vazamentos de várias magnitudes foram estabelecidos através de orifícios variando entre 0,4 mm a 5 mm. A pressão de operação do sistema estava compreendida entre 2,0 a 7,0 kgf/cm².

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. O sinal gerado pelo microfone foi amplificado e passou por um banco de filtros sendo transformado em três sinais com amplitudes independentes, com faixa de frequência de 1kHz, 5 kHz e 9 kHz. O programa de aquisição de dados foi escrito em linguagem C para ler e processar os dados.

Os resultados obtidos com o sistema vaso-tubulação com alimentação contínua de ar mostram 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 testados. O mesmo não ocorre com transientes de pressão. A queda de pressão provocada no sistema para alguns casos, com orifícios de até 2,0 mm, foi muito pequena, impossibilitando a detecção por pressão.

SANTOS (2011) apresentou dados experimentais utilizando redes neurais artificiais na determinação da magnitude do vazamento utilizando tubulações rígida e flexível. Foram analisadas as características do ruído sonoro gerado pela ocorrência de vazamento de gás em uma tubulação rígida de ½” de diâmetro e 60 m de comprimento e em uma tubulação flexível (mangueira) de ¾” de diâmetro e 100 m de comprimento, alimentada através de um vaso de pressão, com alimentação contínua de gás, sob diversas condições de operação.

Para determinar a ocorrência e a magnitude do orifício foram utilizados apenas os três sinais de frequências advindos do microfone como entrada no modelo neural. Os dados originais foram submetidos ao cálculo da média móvel com 40 pontos, reduzindo o ruído ainda existente nos dados e facilitando o treinamento da rede neural, pois esta faz uso dos dados históricos do sistema. Foram realizados testes off-line para detectar a ocorrência do vazamento, bem como a magnitude do vazamento utilizando a tubulação flexível e rígida.

Foi realizado também o treinamento de um segundo modelo neural atuando na localização do vazamento para a tubulação rígida. Com a determinação do vazamento através do primeiro modelo neural, o segundo modelo foi ativado determinando a localização. Os resultados indicaram uma potencialidade no modelo, pois nos testes online

realizados o modelo realizou a predição satisfatoriamente do local, mas a precisão apresenta dependências do alcance do microfone.

Os resultados obtidos mostraram que foi possível detectar vazamento off-line e online através de redes neurais artificiais com sinais captados através de microfones. Percebeu-se também que foi possível determinar a ocorrência e a magnitude do vazamento através de redes neurais, pois para todas as situações testadas (off-line e online) de pressão inicial do sistema, os modelos conseguiram prever adequadamente os vazamentos provocados de 1 mm; 1,5 mm; 2 mm; 2,5 mm e 3 mm de diâmetro.

2.4 – Conclusão

A análise dos trabalhos relacionados neste capítulo mostrou que sensores acústicos são equipamentos muito utilizados no desenvolvimento de técnicas para detectar vazamentos muito pequenos em um curto espaço de tempo podendo ser aplicado em estruturas industriais em operação, à temperatura ambiente ou elevada. Já as redes neurais têm sido vastamente empregadas para modelagem de processos devido à sua capacidade de captar dinâmicas não lineares e à sua fácil implementação. Esta ferramenta tem se provado eficiente não só em modelagem, como também na predição de variáveis de processos para posterior implementação de alguma estratégia de controle.

Dando continuidade ao trabalho desenvolvido na dissertação de mestrado (SOUSA, 2007) e nas investigações realizadas pelo grupo de pesquisas do DESQ/FEQ/Unicamp, o objetivo deste trabalho foi de detectar, localizar e determinar a magnitude do vazamento simultaneamente através do uso de redes neurais artificiais como ferramenta de análise de dados do obtidos experimentalmente em laboratório através de um transdutor de pressão e do microfone em dutos rígidos e ou flexíveis transportando produtos gasosos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Sistema Experimental

Este trabalho tem como objetivo a apresentação do sistema experimental utilizado na detecção de vazamentos de gás, através do método acústico e da análise do transiente de pressão.

Foram analisados o ruído sonoro e as características do transiente de pressão gerados pela ocorrência de vazamento de gás em uma tubulação rígida de ½” polegada de diâmetro e 60 metros de comprimento e/ou em uma tubulação flexível (mangueira) de ¾” de diâmetro e 100 m de comprimento, ligada a um vaso de pressão, com alimentação contínua de gás, sob diversas condições de operação.

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.

Os vazamentos foram provocados manualmente através de válvulas de abertura/fechamento rápido instaladas ao longo da tubulação rígida e ou flexível, conforme Figuras 3.1 e 3.2 respectivamente. 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 1,0 e 5,0 mm.

O monitoramento dos vazamentos foi feito através de um microfone e de um transdutor de pressão no vaso de pressão à entrada da tubulação, 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: tubulação rígida de ferro galvanizado e tubulação flexível (mangueira). As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam a montagem experimental para as duas situações.

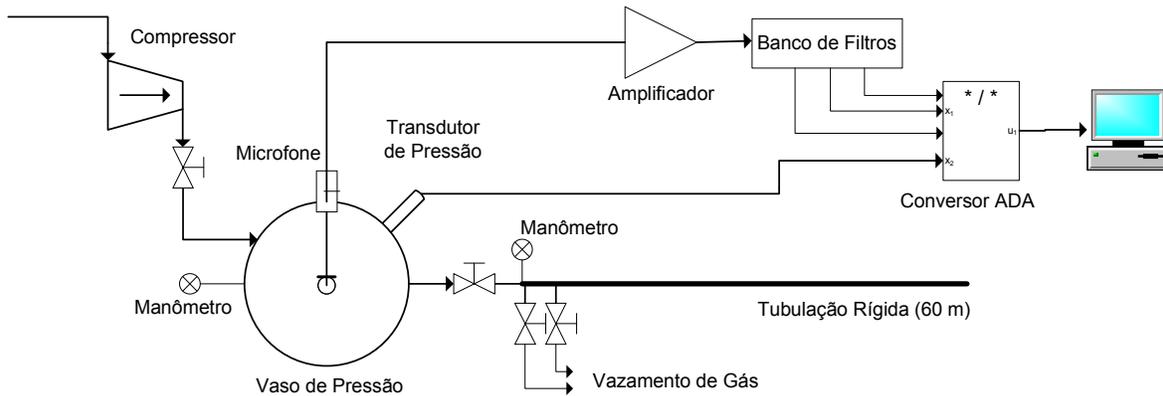


Figura 3.1 – Sistema experimental operando com tubulação rígida.

Na tubulação rígida foram provocados vazamentos em dois pontos diferentes. O primeiro vazamento estava localizado à entrada da tubulação e o segundo, localizado a 3,0m do início da tubulação.

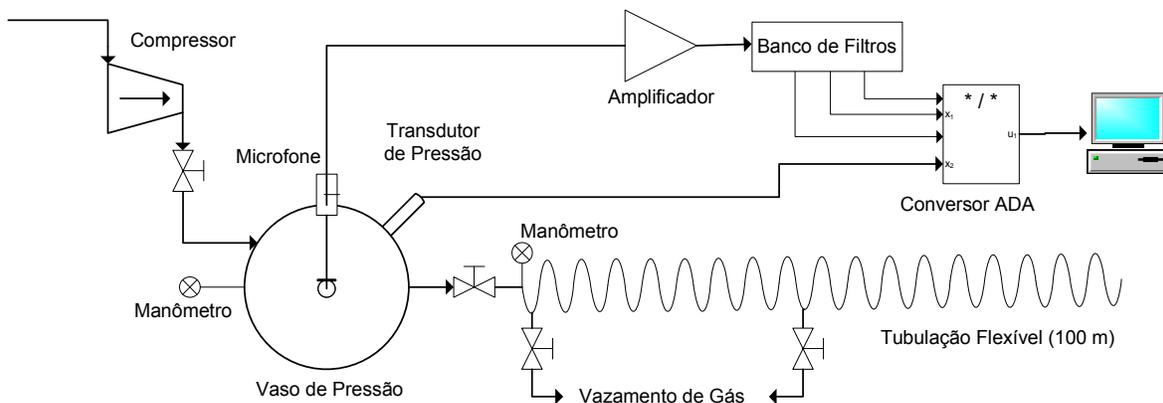


Figura 3.2 – Sistema experimental operando com tubulação flexível.

Na tubulação flexível foram provocados vazamentos em dois pontos diferentes. O primeiro vazamento estava localizado à entrada da tubulação e o segundo, localizado a 50m do início da tubulação.

O sistema utilizado para a realização dos ensaios de detecção de vazamento de gás na tubulação está apresentado nas Figuras 3.3 a 3.5, onde se observa: o vaso de pressão com capacidade de armazenar 34,5 litros de ar comprimido a uma pressão de até 19kgf/cm², tubulação de ferro galvanizado de 60 m de comprimento e o microcomputador.



Figura 3.3 – Vaso de Pressão.



Figura 3.4 – Tubulação ferro galvanizado.



Figura 3.5 – Microcomputador em funcionamento.

3.1.1 – Especificação dos equipamentos

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 diferença de potencial quando submetida a uma deformação mecânica. 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, ou seja, apresenta pouquíssima distinção quanto à direção em que o som incide, respondendo igualmente aos sons provenientes de todas as direções.

Vaso de Pressão: constituiu-se de um botijão de gás (Figura 3.3) com capacidade para armazenar 34,5 litros a uma pressão de até 19 kgf/cm².

Tubulação Rígida: 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.

Tubulação Flexível: foi utilizada uma tubulação flexível (mangueira) de PVC transparente reforçada com um fio helicoidal de ¾” de diâmetro e 100 metros de comprimento.

Pré-Amplificador: é um circuito capaz de elevar o nível de amplitude da grandeza (tensão/corrente) disponibilizando-a em uma relação sinal/ruído maior

utilizado no sistema experimental com a finalidade de 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. O pré amplificador estava conectado ao microfone no interior do vaso de pressão através de um cabo blindado.

Banco de Filtros Passa Faixa: circuito elétrico que tem a finalidade de compatibilizar novamente o sinal gerado pelo microfone com aquele compreendido pela placa de aquisição Analógica – Digital. O banco de filtros passa-faixa, desenvolvido por PAVAN (2005), 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 ruído gerado.

Placa conversora Analógico/Digital/Analógico: a placa utilizada neste experimento é a placa ADA de 12 bits, versão 2.2 da TAURUS ELETRÔNICA – Brasil e tem como finalidade realizar a conversão de sinais analógicos em digitais e vice-versa.

Microcomputador: O microcomputador (Figura 3.4) utilizado na montagem experimental foi um Pentium 233 MHz, disco rígido de 500MB e 16 MB RAM.

3.1.2 – Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado para detecção do vazamento de gás (ar) constituiu-se de sensor e transdutor, condicionador de sinal, placa conversora ADA, microcomputador e programa de aquisição de dados em linguagem C. Este sistema tem como finalidade a aquisição dos dados fornecidos pelo microfone e pelo transdutor de pressão.

Sensor e Transdutor: são dispositivos que captam variações físicas e convertem-nas em sinais e impulsos elétricos que indicam esta grandeza. Para a aquisição de dados foi utilizado um transdutor de pressão para medir a variação de pressão e um microfone para captar o ruído sonoro gerado pelo vazamento na tubulação, ambos localizados no interior do vaso de pressão. O transdutor e o microfone foram conectados ao microcomputador, através da placa ADA.

Condicionador 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 Analógica/Digital.

Placa Conversora Analógica/Digital/Analógica (ADA): A placa conversora ADA é composta de um multiplexador, um Conversor Analógico/Digital (CAD), um Conversor Digital/Analógico (CDA) e uma placa Digital/Digital (D/D). Foi necessário utilizar um multiplexador e um conversor Analógico/Digital (CAD) em conjunto com o microcomputador, pois os sinais dos conversores enviados simultaneamente ao microcomputador são de natureza analógica. 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.

Microcomputador: responsável por receber os dados emitidos pelo microfone e transdutor, arquivá-los e apresentar os dados experimentais em forma gráfica ao usuário em tempo real. O microcomputador faz a interface entre o programa de aquisição de dados em linguagem C e a placa conversora ADA.

Programa de Aquisição de Dados: O programa de aquisição de dados foi elaborado em linguagem C e tem como finalidade armazenar os sinais emitidos pelo sensor e transdutor de forma a fornecer os dados organizados em forma de arquivo para que posteriormente estes possam ser consultados, analisados e utilizados na rede neural. A listagem do programa de aquisição de dados dos experimentos realizados encontra-se no Apêndice A e apresentam as seguintes funções:

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:
 - a. Aquisição de dados.
 - b. Filtragem por média aritmética.
 - c. Conversão dos dados lidos em sinais digitais e posteriormente em unidades de amplitude (volts) e pressão (kgf/cm²).
 - d. Variável *tempo2* assume o valor de *clock()*.
 - e. Cálculo do tempo de aquisição por ponto, subtraindo o valor das variáveis *tempo2* de *tempo1*.
 - f. Gravação do arquivo de resultados.
 - g. Apresentação na tela do microcomputador dos três valores obtidos em amplitude e do valor obtido em pressão.
 - h. Apertar uma tecla para sair do *loop* de leitura
 - i. Voltar ao início do *loop* de leitura.
11. Limpeza de tela.
12. Fim do programa de aquisição de dados.

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 Analógico/Digital foi preparado para trabalhar na faixa 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.

A relação entre a tensão de entrada (SA) e o número decimal (ND) é linear conforme a equação 3.1. 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.

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

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 (Apendice A).

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.

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.

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 gasto pelo computador é considerado importante, pois quanto mais rápido for o processamento dos dados, mais rápido será detectado uma mudança no sistema.

Filtragem de dados: a filtragem dos dados tem como finalidade reduzir os ruídos gerados por instrumentos de medição, equipamentos elétricos, distância entre a instrumentação e a placa de aquisição de dados ou variáveis do processo. Estes ruídos podem interferir na aquisição dos dados dificultando a identificação do vazamento. Portanto foram utilizados dois filtros: um filtro por média aritmética e um filtro analógico.

O filtro de 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.

Os filtros analógicos são circuitos elétricos cuja resposta em frequência, relativa ao ganho de tensão, tem valores significativos em faixas específicas de frequência. Neste experimento foram utilizados dois tipos de filtros analógicos: o filtro passa-baixa e o filtro passa-faixa, mas apenas o filtro passa-baixa foi utilizado com a intenção de reduzir os ruídos, pois o filtro passa-faixa serviu na separação das frequências estabelecidas.

3.2 – Procedimento Experimental

Os experimentos foram realizados em duas etapas distintas. Na primeira etapa foram realizados experimentos utilizando a tubulação rígida (Figura 3.1) no sistema de detecção de vazamento. A segunda etapa foi composta por experimentos utilizando a tubulação flexível (Figura 3.2). Todos os experimentos foram realizados com alimentação contínua e com o transdutor de pressão e microfone instalados no interior do vaso de pressão.

As etapas do procedimento experimental foram:

1. Instalação do orifício de 0,8 mm na extremidade final das tubulações para mantê-las pressurizadas.
2. Instalação do orifício que controla a magnitude do vazamento. Foram utilizados orifícios de magnitudes entre 1,0 a 5,0 mm.
3. Preenchimento do sistema com ar comprimido a uma determinada pressão. Cada teste tem um valor fixo de pressão inicial, na faixa de 2,0 a 6,0 kgf/cm² acima da pressão ambiente.
4. A válvula de alimentação é mantida aberta durante todo o experimento.
5. O programa de aquisição de dados é inicializado e é dado o nome do arquivo de resultados.
6. O vazamento é provocado manualmente.

7. 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.
8. O programa de aquisição de dados é finalizado.

3.2.1 – Monitoramento do sistema durante a realização dos experimentos

A primeira fase do trabalho constituiu-se na coleta de dados para detecção de vazamentos no sistema com alimentação contínua de ar através do método acústico e da análise de transiente de pressão.

O orifício que controla a magnitude do vazamento foi instalado no ponto escolhido em uma seção da saída lateral da tubulação, anterior à válvula de abertura/fechamento rápido 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 foi mantida aberta durante todo o experimento. O programa de aquisição de dados foi iniciado e o vazamento foi provocado em seguida.

Após a finalização do programa de aquisição de dados, o arquivo de dados foi gerado. Este arquivo de dados contém informações do tempo do experimento, do sinal do transdutor de pressão e da dinâmica dos três sinais de frequências do microfone, que serão analisados e posteriormente utilizados para treinamento e teste off-line do modelo neural artificial. Foram realizados testes sob várias condições de operação conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Condições Experimentais.

Condições de Operação	Tubulação Rígida	Tubulação Flexível
Pressão interna do sistema (kgf/cm ²)	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0	2,0; 4,0; 6,0
Magnitude do orifício de vazamento (mm)	1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0	1,0; 2,0; 3,0
Localização do vazamento (m à entrada da tubulação)	0; 3,0	0; 50

3.3 – Redes Neurais Artificiais (RNA's)

3.3.1 - Definição

As Redes Neurais Artificiais (RNA's) são ferramentas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirada nos neurônios biológicos e na estrutura do cérebro humano com capacidade de adquirir e armazenar conhecimentos experimentais e torná-los disponíveis para o uso. Sua principal característica é o processamento paralelo e seu objetivo é estabelecer uma relação linear, ou não, entre um conjunto de dados de entrada e uma correspondente saída ou resposta. Para isto, são utilizadas transformações matemáticas na entrada, de modo a produzir a saída desejada (HAYKIN, 2001).

O neurônio artificial é uma estrutura lógica-matemática que procura simular a forma, o comportamento e as funções de um neurônio biológico. A RNA é constituída por vários neurônios interconectados de modo que cada conexão, ou sinapses, possuem um peso ou força própria e que cada neurônio aplica uma função de ativação à sua entrada da rede para determinar uma saída apropriada. A forma como os neurônios estão organizados na RNA constitui sua arquitetura. Uma RNA pode ser classificada como monocamada (possui apenas uma camada de entrada e uma de saída) ou multicamada (possui uma camada intermediária, além das camadas de entrada e de saída), sendo esta última capaz de resolver uma gama maior de problemas. A RNA pode processar relações lineares e não-lineares, sendo que o interesse está justamente nas não-linearidades (FUJIKI, 2009).

3.3.2 – Estrutura da RNA

Uma rede neural consiste em um conjunto de neurônios (unidades de processamento) em camadas e nas conexões entre eles (sinapses) através de funções de ativação. Estas funções de ativação estão associadas a um determinado peso. A primeira camada da rede recebe os dados de entrada e última camada fornece dados de saída. As camadas internas são chamadas de camadas intermediárias ou ocultas. A função dos neurônios da camada intermediária é intervir entre a entrada externa e a saída da rede de uma maneira útil (PACIANOTTO, 2003).

Todas as redes neurais devem ter uma camada de neurônios de entrada, uma de saída e, no mínimo, uma camada intermediária. As diferentes possibilidades existentes de conexões entre as camadas de neurônios podem gerar estruturas diferentes, como quantidade de camadas intermediárias, quantidade de neurônios nas camadas, conexões entre as camadas, função de transferência e algoritmo de aprendizado (SANTOS, 2011).

A Figura 3.6 apresenta um esquema da estrutura simplificada de uma rede neural artificial com uma única camada intermediária.

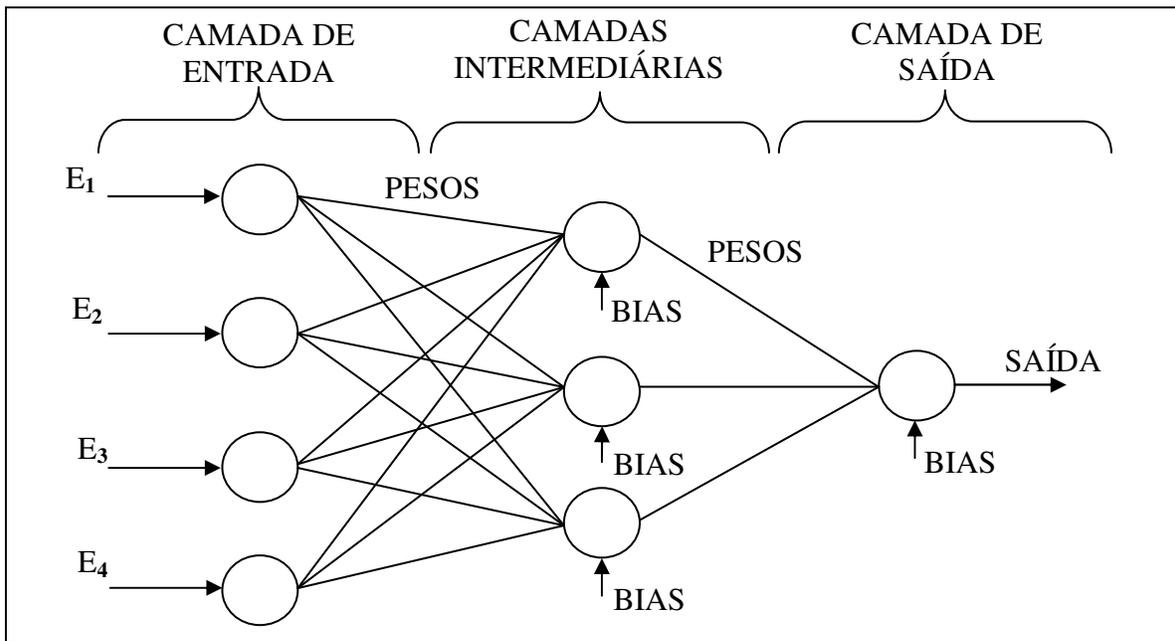


Figura 3.6 – Esquema simplificado de uma estrutura de um modelo neural.

Cada neurônio artificial aplica uma função de ativação ao sinal de entrada para determinar a saída, conforme mostra a Equação 3.5. O neurônio artificial recebe um valor de entrada E que é multiplicado por um peso (w), o somatório desta multiplicação com o bias (b) forma o argumento da função transferência f . Os neurônios podem usar qualquer função de transferência (f) para gerar suas saídas (a).

$$a = f(Ew + b) \quad (3.5)$$

Onde: a : saída do neurônio; $f(Ew + b)$: argumento da função de ativação; w : peso; E : entrada do neurônio e b : bias.

O *bias* tem a função de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação, dependendo se ele for positivo ou negativo, respectivamente.

A *função de transferência* restringe o intervalo permissível de amplitude de saída do neurônio a um valor finito. Os tipos básicos de funções de transferência são: linear, logaritmo-sigmoidal e tangente hiperbólica.

3.3.3 – Topologia da RNA

A estrutura ou topologia de uma RNA se refere à maneira como os neurônios artificiais estão interconectados e organizados em camadas. Basicamente, existem as *conexões intracamadas*, as saídas de um neurônio alimentam outros neurônios de uma mesma camada; as *conexões intercamadas*, as saídas de um neurônio em uma camada alimentam nódulos de outras camadas e as *conexões recursivas*, a saída de um nódulo alimenta ele próprio (FILETI, 1995).

Conforme HAYKIN (2001), a maneira pela qual os neurônios de uma rede neural estão estruturados está intimamente ligada com o algoritmo de aprendizagem usado para treinar a rede. Em geral, são identificadas três classes de arquiteturas de rede:

- *Redes Feedforward com Única Camada*: tem-se uma camada de nós de fonte que se projeta sobre uma camada de saída de neurônios (nós computacionais), mas não vice-versa. Em outras palavras, esta rede é estritamente do tipo alimentada adiante ou acíclica.
- *Redes Feedforward com Múltiplas Camadas*: a segunda classe de uma rede neural alimentada adiante se distingue pela presença de uma ou mais camadas intermediárias, cujos nós computacionais são chamados correspondentemente de neurônios ocultos ou unidades intermediárias.
- *Redes Recorrentes*: Uma rede neural recorrente se distingue de uma rede neural alimentada adiante por um laço de realimentação. Estes laços de realimentação têm um impacto profundo na capacidade de aprendizagem da rede e no seu desempenho.

3.3.4 – Treinamento da RNA

Os treinamentos das redes neurais artificiais caracterizam-se pela habilidade de aprender por meio de exemplos. Para um determinado conjunto de dados, o algoritmo de treinamento é responsável pela adaptação dos parâmetros de rede, de maneira que em um número finito de interações de algoritmos haja uma convergência para uma solução. O critério de convergência varia de acordo com algoritmo de aprendizagem que provoca mudanças no comportamento da rede. Espera-se que a mudança gradual no comportamento da rede resulte em melhoria gradativa do seu desempenho.

Basicamente, existem três tipos de treinamentos ou aprendizagem:

- *Supervisionado*: é fornecido à rede um conjunto-exemplo de dados de entrada e saída,
- *Por Estímulo*: a rede recebe um indicador de desempenho em intervalos de tempo regulares,
- *Por Auto-Aprendizagem*: utiliza-se um algoritmo de aprendizagem por competição.

A forma mais comum de treinamento é o aprendizado supervisionado, basicamente por meio do aprendizado por correção do erro. Este tipo de aprendizado comporta-se de maneira que a cada instante de amostragem se sabe a resposta desejada, onde se usa a diferença entre a resposta desejada e a calculada para corrigir o comportamento da rede e continuar o treinamento (SANTOS, 2011).

Há muitos algoritmos de treinamento de redes *feedforward* com aprendizado supervisionado, mas alguns são mais utilizados, como os descritos abaixo:

O Algoritmo *Backpropagation* é um algoritmo básico de treinamento e opera em uma sequência de dois passos. No primeiro passo, um conjunto de variáveis é apresentado aos neurônios de entrada da rede e seu efeito se propaga através da rede, camada por camada, até que um conjunto de saídas seja produzido pela camada de saída. No segundo passo, a saída obtida é comparada a saída desejada para este conjunto em partículas. Caso a saída obtida não esteja correta, o erro é calculado. O erro é propagado a partir da camada de saída até a camada de entrada, e os pesos das conexões das unidades das camadas internas

vão sendo modificados conforme o erro retro-propagado, ou seja, o *Algoritmo Backpropagation* consiste em atualizar os pesos em função do erro.

O Algoritmo de *Levenberg-Marquardt* é um método de treinamento que converge com uma velocidade maior que o Algoritmo *Backpropagation*, que é baseado no método de gradiente descendente. O Algoritmo de *Levenberg-Marquardt* é uma aproximação do método de Newton. O Algoritmo de treinamento de *Levenberg-Marquardt* é uma técnica de otimização numérica que demanda uma grande quantidade de memória e elevada complexidade computacional.

Podemos considerar, portanto, que o objetivo do treinamento da rede neural é apresentar pequenos erros para o conjunto de dados de treinamento, bem como responder bem aos dados de entradas ainda desconhecidas. Quando a rede neural é capaz de responder adequadamente a uma nova entrada, diz-se que ela generaliza bem. Porém quando a rede só é capaz de representar bem o conjunto de dados utilizados no treinamento, não generalizando, dizemos que ocorreu um problema durante o treinamento da rede neural, denominado sobre ajuste.

Para evitar o sobre ajuste e, portanto, melhorar a generalização, deve se usar a regularização, que envolve a modificação da função objetivo, que é normalmente escolhida para ser a média dos erros quadrados da rede no conjunto de treinamento. Utilizando-se o Algoritmo de *Regularização Bayesiana*, a função objetivo do método de Levenberg-Marquardt assume a forma descrita na Equação 3.6.

Assumindo F como função-objetivo tem-se:

$$F = \alpha.SSE + \beta.SSW \quad (3.6)$$

onde:

SSE=somatório dos erros quadrados;

SSW=somatório do quadrado dos pesos e bias;

α e β =parâmetros da função-objetivo.

Uma das características deste algoritmo é fornecer uma medida de quantos parâmetros da rede (pesos e bias) estão efetivamente sendo usados por ela. Este número efetivo de parâmetros permanece aproximadamente constante ao final do treinamento, não importando quão grande é o número original total de parâmetros da rede, sendo um indicativo importante do número de neurônios a ser utilizado na camada intermediária (SANTOS, 2011).

3.4 – Uso das redes neurais para determinar magnitude e localização do vazamento.

Os sinais provenientes do transdutor de pressão e dos três sinais do microfone foram utilizados como entrada no modelo neural para determinar a ocorrência ou não do vazamento, bem como sua magnitude e localização.

Para a tubulação rígida, foram utilizados primeiramente arquivos de dados provenientes da dissertação de mestrado (SOUSA, 2007) para o treinamento off-line da RNA para determinar a ocorrência e a magnitude do vazamento. Posteriormente foram realizados novos experimentos na tubulação rígida com a finalidade de determinar a ocorrência, a magnitude e a localização de vazamentos simultaneamente.

Para a tubulação flexível, foram realizados testes off-line para determinar a ocorrência, a magnitude e a localização de vazamentos simultaneamente.

3.4.1 – Treinamento e arquitetura da rede neural.

Os dados provenientes dos experimentos foram organizados para a realização dos treinamentos das RNA e para cada pressão inicial de operação foi gerado um modelo neural independente. O algoritmo de treinamento dos modelos neurais foi implementado no Software Matlab 7.0 e encontra-se no Apêndice B. O método escolhido para o treinamento da rede neural foi o de Levenberg-Marquardt com Regularização Bayesiana (função “trainbr” no Matlab). O programa desenvolvido no Matlab 7.0 apresenta as seguintes funções:

1. Leitura do arquivo de dados;
2. Divisão dos dados de treinamento e dados de teste;
3. Normalização dos dados entre -1 e 1;
4. Criação da rede neural;
5. Definição do número de épocas;
6. Consideração inicial dos pesos e bias;
7. Treinamento da rede com o conjunto de dados;
8. Simulação da variável de saída a partir das entradas do conjunto de teste;
9. Desnormalização da variável de saída;
10. Geração dos gráficos para análise do erro;
11. Fim do programa.

Os dados experimentais dos três sinais do microfone foram transformados por meio do cálculo de média móvel no tempo em 40 instantes passados, conforme Tabela 3.2, com a finalidade de reduzir o ruído dos dados e facilitar o treinamento das RNAs. O cálculo da média móvel é realizado conforme Equações 3.7 a 3.9. A Equação 3.7 representa o primeiro ponto, Equação 3.8 representa o segundo ponto e a Equação 3.9 representa o cálculo de um ponto N qualquer com número de pontos passados (n) a ser utilizado.

$$a(x) = \frac{a(1) + a(2) + \dots + a(n)}{n} \quad (3.7)$$

$$a(x+1) = \frac{a(2) + a(3) + \dots + a(n+1)}{n} \quad (3.8)$$

$$a(x+N) = \frac{a(1+N) + a(2+N) + \dots + a(n+N)}{n} \quad (3.9)$$

Tabela 3.2 – Cálculo da média móvel realizado com os dados originais das 3 frequências.

Dados Experimentais				Dados calculados		
Tempo (s)	Filtro 1kHz	Filtro 5kHz	Filtro 9kHz	$S_{1\text{kHz}}(k)$	$S_{5\text{kHz}}(k)$	$S_{9\text{kHz}}(k)$
t_1	x_1	y_1	z_1	$a_1=(x_1+x_2+\dots+x_{40})/40$	$b_1=(y_1+y_2+\dots+y_{40})/40$	$c_1=(z_1+z_2+\dots+z_{40})/40$
t_2	x_2	y_2	z_2	$a_2=(x_2+x_3+\dots+x_{41})/40$	$b_2=(y_2+y_3+\dots+y_{41})/40$	$c_2=(z_2+z_3+\dots+z_{41})/40$
t_3	x_3	y_3	z_3	$a_3=(x_3+x_4+\dots+x_{42})/40$	$b_2=(y_3+y_4+\dots+y_{42})/40$	$c_3=(z_3+z_4+\dots+z_{42})/40$
.
.
.
t_{40}	x_{40}	y_{40}	z_{40}	$a_{41}=(x_{41}+x_{42}+\dots+x_{80})/40$	$b_{41}=(y_{41}+y_{42}+\dots+y_{80})/40$	$c_{41}=(z_{41}+z_{42}+\dots+z_{80})/40$
t_{41}	x_{41}	y_{41}	z_{41}	$a_{42}=(x_{42}+x_{43}+\dots+x_{81})/40$	$b_{42}=(y_{42}+y_{43}+\dots+y_{81})/40$	$c_{42}=(z_{42}+z_{43}+\dots+z_{81})/40$
t_{42}	x_{42}	y_{42}	z_{42}	$a_{42}=(x_{43}+x_{44}+\dots+x_{82})/40$	$b_{43}=(y_{43}+y_{44}+\dots+y_{82})/40$	$c_{43}=(z_{43}+z_{44}+\dots+z_{82})/40$
.	.	.	.			
.	.	.	.			
.	.	.	.			
t_{80}	x_{80}	y_{80}	z_{80}			
t_{81}	x_{81}	y_{81}	z_{81}			
t_{82}	x_{82}	y_{82}	z_{82}			

Como entradas na rede neural foram utilizadas os dados do sinal da pressão (P) fornecido pelo transdutor de pressão no instante atual (k) e os dados dos três sinais de frequência (S) fornecidos pelo microfone no instante atual (k) e em três instantes anteriores (k-1, k-2 e k-3), totalizando 13 entradas, conforme Figura 3.7. O intervalo de tempo de aquisição de dados entre os instantes k e k-1 é de aproximadamente 0,16 segundos.

Para a tubulação rígida, quando utilizado os dados da dissertação de mestrado (SOUSA, 2007), foi realizado o treinamento off-line da RNA para determinar a ocorrência e a magnitude do vazamento, ou seja, a RNA apresentou apenas uma saída. Para os novos dados experimentais da tubulação rígida e da tubulação flexível, o treinamento off-line da RNA foi realizado para determinar a ocorrência, a magnitude e a localização do vazamento simultaneamente, obtendo assim duas saídas da RNA. A Figura 3.7 ilustra os dados de entrada e saída do modelo neural.

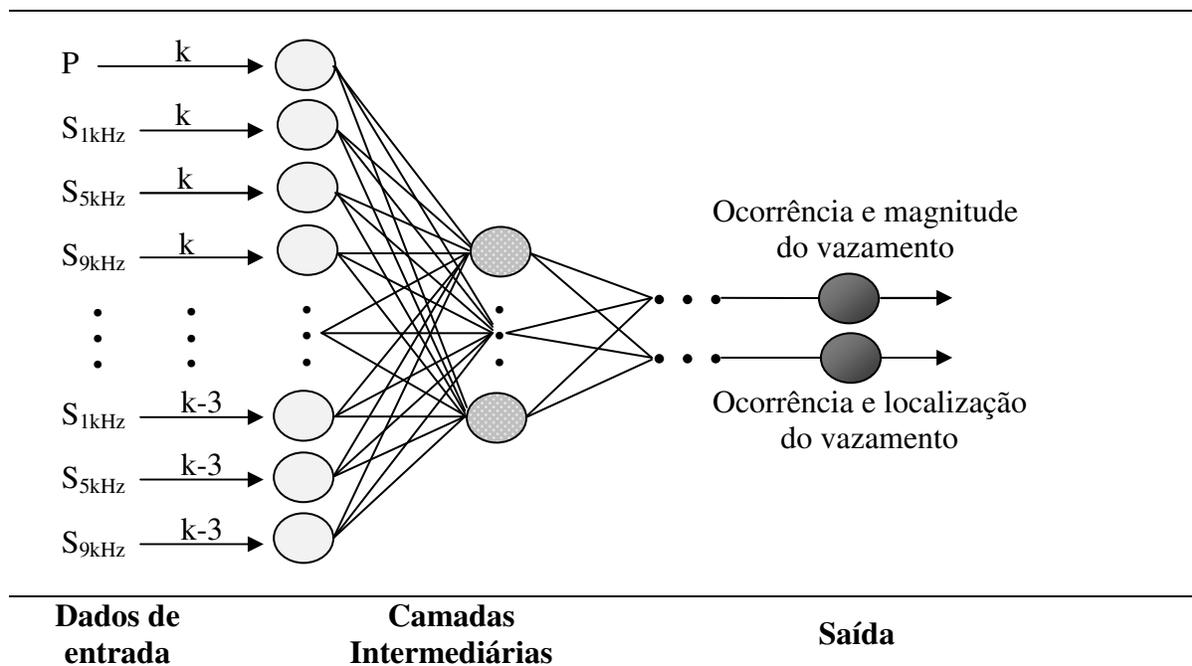


Figura 3.7 – Ilustração estrutural do modelo neural.

As redes neurais são bastante sensíveis à escala dos dados, se os valores destes dados forem muito diferentes, a rede pode erroneamente atribuir uma maior importância a valores maiores (SANTOS, 2011). Portanto, no presente trabalho, o conjunto de dados foi normalizado em uma faixa específica de intervalo, que compreende -1 a 1. O próprio Matlab 7.0 realizou a normalização do conjunto de dados, sendo o `premnmx` (entrada, saída) o comando utilizado para determinar os mínimos (`min`) e máximos (`max`) para cada entrada e saída.

Após a realização do treinamento, os dados de saída da rede são desnormalizados para a faixa de valores reais, realizada também pelo próprio Matlab sob o comando de `postmnmx` (tamanho e localização do vazamento).

Vários testes off-line foram realizados para verificar a melhor Topologia RNA de cada modelo neural formado. Neste testes foram definidos: o número de instantes anteriores usados na camada de entrada, ou seja, o número de nós na primeira camada; o número de camadas intermediárias; e seus respectivos números de neurônios. A função transferência das camadas intermediárias utilizada nos treinamentos das redes neurais e que apresentaram um melhor desempenho foi: função tangente (terminologia Matlab: `tansig`).

No presente trabalho, as melhores configurações foram definidas primeiramente através dos valores dos erros médios quadráticos (MSE) de treinamento, na qual a raiz quadrada do MSE representa a precisão do modelo, sendo que valores menores que 0,1 mm foram aceitáveis, pois erros iguais e inferiores a 0,1 foram considerados pequenos aos orifícios de 1,0mm a 5,0 mm utilizados. Em seguida, foi avaliada a capacidade de generalização dos modelos desenvolvidos, e, portanto, foram gerados e analisados gráficos de dispersão (dados reais versus preditos) usando dados de teste (não vistos no treinamento). Quando os dados se apresentavam na forma de reta coincidente com a diagonal, onde o coeficiente linear se aproximava de zero e o coeficiente angular ficava próximo de um, a configuração do modelo neural foi considerada adequada.

Para melhor visualização dos resultados dos testes, foram apresentados em forma gráfica a diferença entre dados calculados pela rede neural e dados experimentais (erro-mm), e ou erro (m), comprovando o desempenho satisfatório dos modelos neurais desenvolvidos.

3.4.2 – Organização dos dados para o treinamento

Os testes operacionais foram organizados em um arquivo chamado dados.DAT com 13 entradas e 1 saída para determinar a ocorrência e a magnitude do vazamento para os dados obtidos na dissertação de mestrado (SOUSA, 2007) referente a tubulação rígida, denominado modelo neural 1 e outro de 13 entradas e 2 saídas, denominado modelo neural 2, para determinar a ocorrência, a magnitude e a localização do vazamento para novos dados experimentais da tubulação rígida e dados experimentais da tubulação flexível.

Em cada situação operacional testada, os dados experimentais foram organizados conforme Tabela 3.3. Como entrada na rede neural foram utilizados os dados representados a partir da quinta linha na Tabela 3.3.

Os dados utilizados para teste foram diferentes dos dados do treinamento, e correspondiam a 20% do total de dados do arquivo original, compreendidos nas faixas de valores do arquivo de treinamento.

Tabela 3.3 – Organização das variáveis de entrada e saída no arquivo de dados para o treinamento do modelo neural.

P (k)	S_{1kHz} (k)	S_{5kHz} (k)	S_{9kHz} (k)											
p ₁	a ₁	b ₁	c ₁	S_{1kHz} (k-1)	S_{5kHz} (k-1)	S_{9kHz} (k-1)								
p ₂	a ₂	b ₂	c ₂	a ₁	b ₁	c ₁	S_{1kHz} (k-2)	S_{5kHz} (k-2)	S_{9kHz} (k-2)					
p ₃	a ₃	b ₃	c ₃	a ₂	b ₂	c ₂	a ₁	b ₁	c ₁	S_{1kHz} (k-3)	S_{5kHz} (k-3)	S_{9kHz} (k-3)	Saída1	Saída2
p₄	a₄	b₄	c₄	a₃	b₃	c₃	a₂	b₂	c₂	a₁	b₁	c₁	x₁	y₁
p₅	a₅	b₅	c₅	a₄	b₄	c₄	a₃	b₃	c₃	a₂	b₂	c₂	x₂	y₂
p₆	a₆	b₆	c₆	a₅	b₅	c₅	a₄	b₄	c₄	a₃	b₃	c₃	x₃	y₃
.
.
.

A apresentação do tamanho do vazamento na saída do modelo neural 1 deu-se da seguinte forma: 0, representa que não houve vazamento, 1, representa que houve vazamento com tamanho de 1,0 mm de diâmetro, 2, ilustra um vazamento com 2,0 mm de diâmetro, 3, vazamento com 3,0 mm de vazamento, 4, vazamento de 4,0 mm e por fim 5, ilustra vazamento de 5,0 mm. Foram gerados cinco modelos neurais independentes a pressões iniciais de 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 e 6,0 kgf/cm².

No caso do modelo neural 2 desenvolvido para determinar a magnitude e a localização do vazamento simultaneamente, apresentou duas colunas de saída. A primeira coluna representou a ocorrência e a magnitude do vazamento: de forma que 0 representa que não houve vazamento, 1, representa que houve vazamento com tamanho de 1,0 mm de diâmetro, 2, ilustra um vazamento com 2,0 mm de diâmetro e 3, representa vazamento com 3,0 mm de vazamento.

A segunda coluna deu-se da seguinte forma: 0 representa que não houve vazamento, 1, representa que houve vazamento no início da tubulação e 3, representa vazamento à 3,0 m do início da tubulação rígida, Já para a tubulação flexível, 0 representa

que não houve vazamento, 1, representa que houve vazamento no início da tubulação e 50 ilustra o ponto de vazamento a 50 m do início da tubulação.

Utilizando o modelo neural 2, foi gerado um modelo neural à pressão inicial de 6,0kgf/cm² para a tubulação rígida e para a tubulação flexível foram gerados três modelos neurais independentes à pressões iniciais de 2,0; 4,0 e 6,0 kgf/cm²

Para as tubulações rígida e flexível foram realizados testes off-line para todas as condições de operação apresentadas anteriormente para determinar o tamanho do vazamento, bem como sua localização.

3.5 – Cálculo da porcentagem de vazamento através do orifício de vazamento

Uma das equações mais usadas para determinar a perda de carga em uma tubulação é a equação de Darcy Weisbach que é válida tanto para gases como para líquidos.

A equação de Darcy Weisbach, proposta em 1845, pode ser escrita de forma a fornecer a perda de carga em pressão (ΔP em Pa) (LUDWIG, 1995).

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot A^2 \cdot \rho} \quad (3.10)$$

onde: ΔP : queda de pressão ao longo do comprimento do tubo (Pa)

f : fator de atrito (adimensional)

L : comprimento do tubo (m)

D : diâmetro do tubo (m)

Q : vazão do fluido no interior do tubo (kg/s)

A : área da seção transversal do tubo (m²)

ρ : densidade volumétrica do fluido (kg/m³)

Em 1939, quase 100 anos depois, foi estabelecido definitivamente o fator de atrito f , através da equação de Colebrook-White (LUDWIG, 1995).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(0,27 \cdot \frac{k}{D} + \frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (3.11)$$

onde: f = fator de atrito (adimensional)

k = rugosidade equivalente da parede do tubo (m)

D = diâmetro interno do tubo (m)

Re = número de Reynolds (adimensional)

Obviamente, trata-se de uma equação implícita, isto é, a variável f aparece nos dois membros da equação, de forma não ser possível explicitá-la. Para resolver, adota-se um valor inicial qualquer para a variável procurada que está no segundo membro. Calcula-se novo valor para a mesma variável que está no primeiro membro e compara-se a diferença entre o valor calculado e o valor inicial com a tolerância estabelecida. Repetem-se os cálculos usando este valor revisado estimado de f , são feitas interações até que o número de Reynolds não sofra variações.

Considerações:

- O fluido é compressível: a compressibilidade do fluido resulta em fluxo transiente.
- O escoamento é viscoso: a viscosidade resulta em força de cisalhamento no fluido em movimento.
- O escoamento é adiabático: não é considerada a transferência de energia entre o fluido e a tubulação. Consequentemente a temperatura T ao longo da tubulação é constante.
- O escoamento é unidimensional: todas as características da tubulação como a velocidade e a pressão dependem apenas do eixo x ao longo da tubulação.

- Para deduzir as equações consideramos um conduto de comprimento L e de diâmetro D constante.
- A perda de carga aconteceria no caso experimental se a tubulação não tivesse o orifício de 0,8 mm de diâmetro, que a mantém pressurizada na saída. Portanto, foi considerado que a pressão é praticamente igual em toda a extensão da tubulação, ou seja, a perda de carga é praticamente inexistente.

Dessa maneira, para determinar o valor da vazão volumétrica nos experimentos, primeiro foi realizado o cálculo de f através da equação 3.11 e depois utilizou-se a equação 3.10.

Para calcular a porcentagem de vazamento, primeiro foi preciso calcular a vazão de vazamento. O cálculo da vazão de vazamento, em [kg/s], é feito através de uma equação que fornece o fluxo de gás (fluidos compressíveis) através de um bocal ou orifício quando há escoamento na tubulação (LUDWIG, 1995).

$$q_{or} = \rho \cdot Y \cdot C' \cdot A_{or} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (3.12)$$

$$C' = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (3.13)$$

onde: ρ : massa específica do ar (kg/m^3)

Y: é o fator de expansão

C' é o coeficiente de fluxo para o orifício

C_d: o coeficiente de descarga do orifício

β : a razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro interno

A_{or}: Área do orifício de vazamento (m^2)

ΔP : variação da pressão (Pa)

3 – Materiais e Métodos

Como a descarga de ar da tubulação é feita para a atmosfera, ΔP é igual à pressão manométrica na entrada. A massa específica ρ foi calculada nas condições de fluxo e o fator de expansão Y é dependente de ΔP e de β (obtido através da Figura 2-38 B, LUDWIG,1995).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Monitoramento dos vazamentos através do transdutor de pressão e do microfone

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e as respectivas análises, tendo-se acrescentado eventuais explicações adicionais, quando necessário. No item 4.1.1 foram apresentados os transientes de pressão e as variações em amplitude dos ruídos sonoros descritos na dissertação de mestrado (SOUSA, 2007) com a finalidade de utilizar as redes neurais artificiais para determinar a ocorrência ou não e a magnitude do vazamento na tubulação rígida. Em seguida são apresentados novos dados experimentais realizados no doutorado com a finalidade de determinar simultaneamente a ocorrência do vazamento, bem como sua magnitude e localização na tubulação rígida. Na sequência, no item 4.1.2, foram apresentados os transientes de pressão e as variações em amplitudes dos ruídos sonoros gerados pelo vazamento na tubulação flexível realizados no doutorado.

4.1.1 – Tubulação Rígida

As diversas situações dos experimentos descritos na dissertação de mestrado (SOUSA, 2007) para a determinação da magnitude do vazamento utilizando a Tubulação Rígida estão apresentadas na Tabela 4.1. Foram selecionados experimentos com alimentação contínua de ar quando o transdutor de pressão e o microfone estavam localizados no vaso de pressão. Os vazamentos foram provocados manualmente através de uma válvula de abertura/ fechamento rápido instalada em uma saída lateral na entrada da tubulação. Foi instalado um orifício de 0,8 mm na extremidade de saída da tubulação para mantê-la pressurizada.

Tabela 4.1 – Situações Experimentais para a Tubulação Rígida (SOUSA, 2007).

Tubulação Rígida		
Orifícios (mm)	Pressão (kgf/cm²)	Ganho
1,0	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0	1
2,0	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0	1
3,0	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0	0,1
4,0	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0	0,1
5,0	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0	0,1

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 pré-estabelecido em 150 segundos. Tempo este suficiente para provocar o vazamento na tubulação e coletar os dados que posteriormente foram utilizados no teste off-line para determinar e localizar o vazamento.

O ganho foi de 1 no banco de filtros passa faixa quando se utilizou orifícios de 1,0 e 2,0 mm de magnitude e para que os valores da amplitude em frequência não ultrapassassem o valor máximo que a placa de aquisição A/D pode converter e, conseqüentemente para que se obtenha uma leitura adequada das amplitudes em frequência geradas pela ocorrência do vazamento, o ganho no circuito banco de filtros passa faixa foi ajustado em 0,1 quando utilizou-se orifícios de 3,0; 4,0 e 5,0 mm (SOUSA, 2007).

Usar ganhos diferentes não é um procedimento adequado para o reconhecimento on-line dos vazamentos, pois numa operação normal qualquer magnitude de vazamento poderia ocorrer e, portanto, deveria ser reconhecido. Porém para verificar a possibilidade de uso das RNA's usando a maior quantidade de dados, estas informações obtidas na dissertação de mestrado (SOUSA, 2007) foram consideradas e utilizadas no treinamento e teste.

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.

Para orifícios de 1,0 mm a ocorrência de vazamento não provocou alteração significativa no valor da pressão, de modo que o vazamento pudesse ser prontamente detectado, pois a queda de pressão provocada no sistema pelo vazamento foi muito pequena. Para o orifício de 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.

De acordo com PAVAN (2005), frequências abaixo de 1 kHz apresentam sons mais graves enquanto que frequências acima de 9 kHz apresentam sons mais agudos. Portanto, verificou-se que em todas as situações as amplitudes da frequência com 5 kHz superam as amplitudes com frequência de 9 kHz, apresentando um som grave.

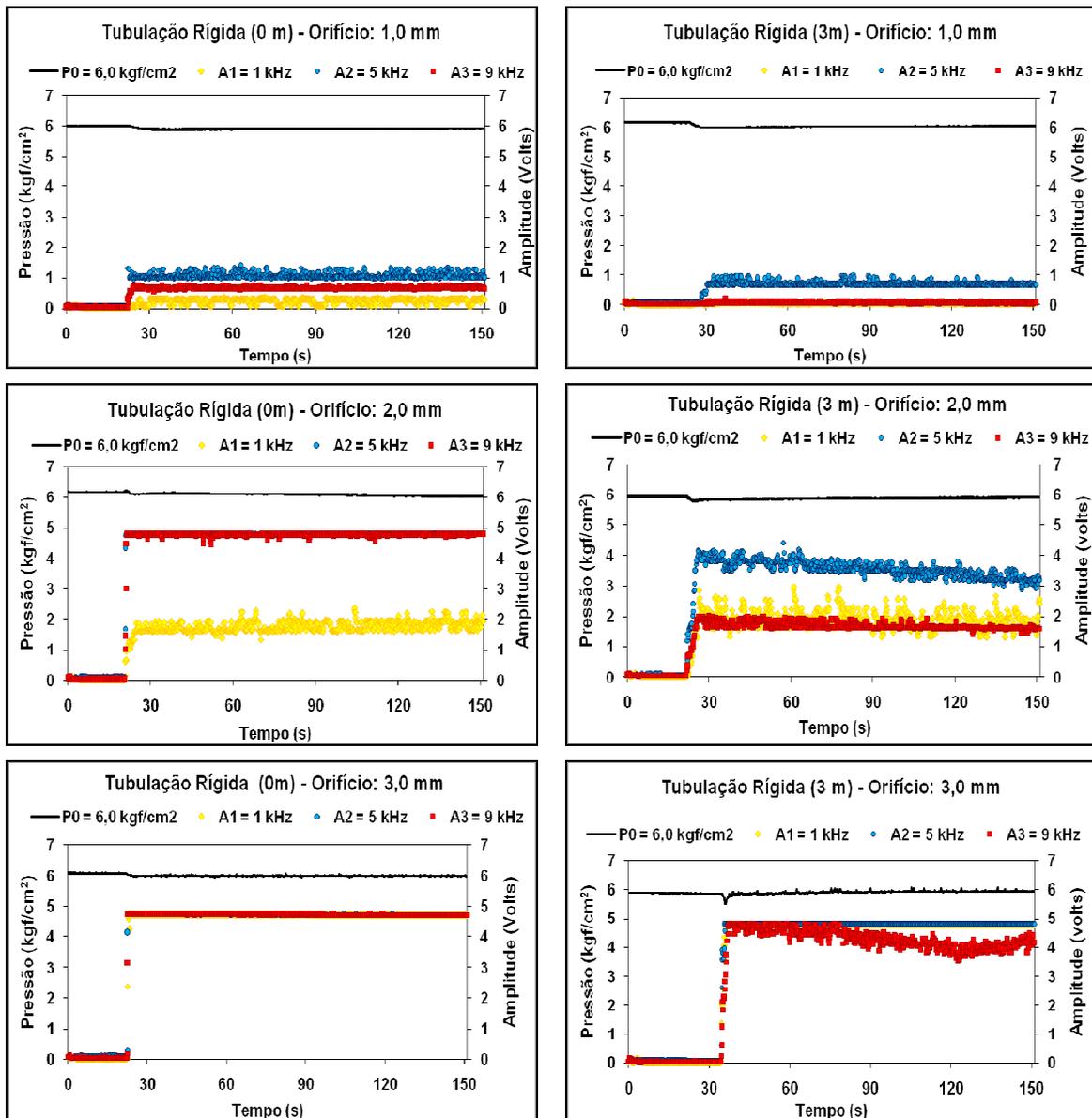
Observou-se também que quando foi utilizado o mesmo ganho no banco de filtros passa faixa (0,1), a uma mesma pressão inicial ($6,0 \text{ kgf/cm}^2$) e orifícios de magnitude diferentes (3,0 e 5,0 mm), as três frequências apresentaram um aumento em amplitude para o orifício de maior magnitude (5,0 mm). Para o orifício de 3,0 mm, a frequência de 5 kHz supera em amplitude a frequência de 1 kHz, enquanto que para o orifício de 5,0 mm a diferença entre as amplitudes das frequências de 1 kHz e 5 kHz é nula, indicando um som mais grave.

Para determinar a localização do vazamento na tubulação de ferro galvanizado foram utilizados novos dados experimentais obtidos no doutorado com pressão inicial de $6,0 \text{ kgf/cm}^2$ utilizando-se orifícios de 1,0; 2,0 e 3,0 mm de diâmetro e vazamentos localizados na posição inicial da tubulação (0 m) e a 3 m do início da tubulação. Estes testes tiveram como finalidade a comparação com os testes realizados por SANTOS (2011) nas mesmas condições de operação.

A Figura 4.2 apresenta o comportamento dos transientes de pressão e as variações em amplitude do ruído sonoro provocados por vazamentos de magnitude de 1,0; 2,0 e 3,0 mm a uma pressão inicial de $6,0 \text{ kgf/cm}^2$ e para vazamentos provocados a 0 m e a 3 m em relação ao início da tubulação. Foi utilizado ganho de 4 no banco de filtros passa faixa para vazamentos provocados a 0 m e a 3 m do início da tubulação.

Como na etapa anterior, no momento em que o vazamento foi provocado a pressão interna na tubulação sofreu uma redução, em alguns casos existe uma ligeira recuperação, e permanece constante e por outro lado, a amplitude do ruído sonoro aumenta bruscamente. Para o mesmo ganho no banco de filtros passa faixa o aumento na magnitude do diâmetro do vazamento também aumentou a amplitude do ruído sonoro gerado.

Na Figura 4.2(a), para o orifício de 2,0 mm, as frequências de 5 kHz e 9 kHz ultrapassaram o limite em que a placa de aquisição pode converter, que é de 4,75 Volts, utilizando ganho de 4 no banco de filtros passa faixa. Porém, visando o treinamento do modelo neural, para determinar a ocorrência, a magnitude e a localização do vazamento simultaneamente, o ganho foi mantido em 4. Logo, não foi possível fazer uma leitura adequada das amplitudes em frequência geradas pela ocorrência do vazamento para orifício de magnitude de 3,0 mm.



(a) Posição do Vazamento: 0 m

(b) Posição do Vazamento: 3,0 m

Figura 4.2 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro. P0 = 6,0 kgf/cm².

4.1.2 – Tubulação Flexível

Inicialmente foi adquirido um perfil do comportamento dos transientes de pressão e da amplitude do ruído sonoro ao longo do tempo quando a tubulação flexível operava normalmente com a presença apenas dos ruídos do processo, ou seja, sem a presença de vazamentos. Foram realizados testes com pressões iniciais de 2,0; 4,0 e 6,0 kgf/cm² e todos os testes apresentaram semelhança na variação das frequências em amplitude provocadas pelo sistema sem presença de vazamentos. Estes perfis de comportamentos estão representados na Figura 4.3.

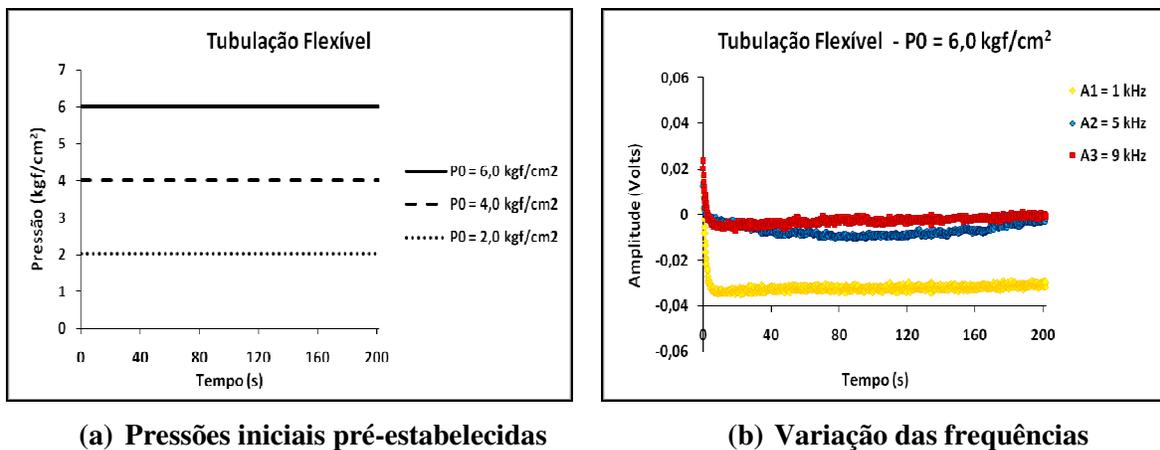


Figura 4.3 – Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro Tubulação Flexível.

Foi observado que a pressão se manteve constante no sistema durante a realização do experimento, e o microfone não apresentou variação das frequências em amplitude, mantendo-se em torno de 0 (zero) Volts.

Antes dos vazamentos serem provocados, o ganho no circuito banco de filtros passa faixa foi ajustado de acordo com a variação da pressão inicial interna do sistema para que as frequências apresentassem perfis iniciais conforme Figura 4.3(b), ou seja, amplitude em torno de zero.

A Tabela 4.2 apresenta as diversas situações utilizadas para a realização dos experimentos utilizando-se a Tubulação Flexível. Foram realizados experimentos para vazamentos provocados no início da tubulação (0 m) e a 50 m do início da tubulação.

Para cada diâmetro de orifício de vazamento utilizado em ambas as situações, foram utilizadas pressões de 2,0; 4,0 e 6,0 kgf/cm². Foi utilizado ganho de 2 no circuito banco de filtros passa faixa para orifícios de 1,0 e 2,0 mm. Para o orifício de 3,0 mm o ganho utilizado no banco de filtros passa faixa foi ajustado em 1 com o objetivo de se obter uma leitura adequada das amplitudes em frequência geradas pela ocorrência do vazamento.

Tabela 4.2 – Situações Experimentais para a Tubulação Flexível.

Tubulação Flexível					
Vazamento a 0 m do início da tubulação			Vazamento a 50 m do início da tubulação		
Orifícios (mm)	Pressão (kgf/cm²)	Ganho	Orifícios (mm)	Pressão (kgf/cm²)	Ganho
1,0	2,0, 4,0, 6,0	2	1,0	2,0, 4,0, 6,0	2
2,0	2,0, 4,0, 6,0	2	2,0	2,0, 4,0, 6,0	2
3,0	2,0, 4,0, 6,0	1	3,0	2,0, 4,0, 6,0	1

As Figuras 4.4 a 4.6 apresentam os transientes de pressão e as variações das frequências de 1, 5 e 9 kHz em amplitude gerados por vazamentos provocados nas posições 0 e 50 m da tubulação flexível utilizando-se orifícios de 1,0; 2,0 e 3,0 mm de diâmetro, à pressões iniciais de 2,0; 4,0 e 6,0 kgf/cm².

Como na etapa anterior, 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 pré-estabelecido em 120 segundos. Tempo este suficiente para provocar o vazamento na tubulação e coletar os dados que posteriormente foram utilizados no teste off-line para determinar e localizar o vazamento.

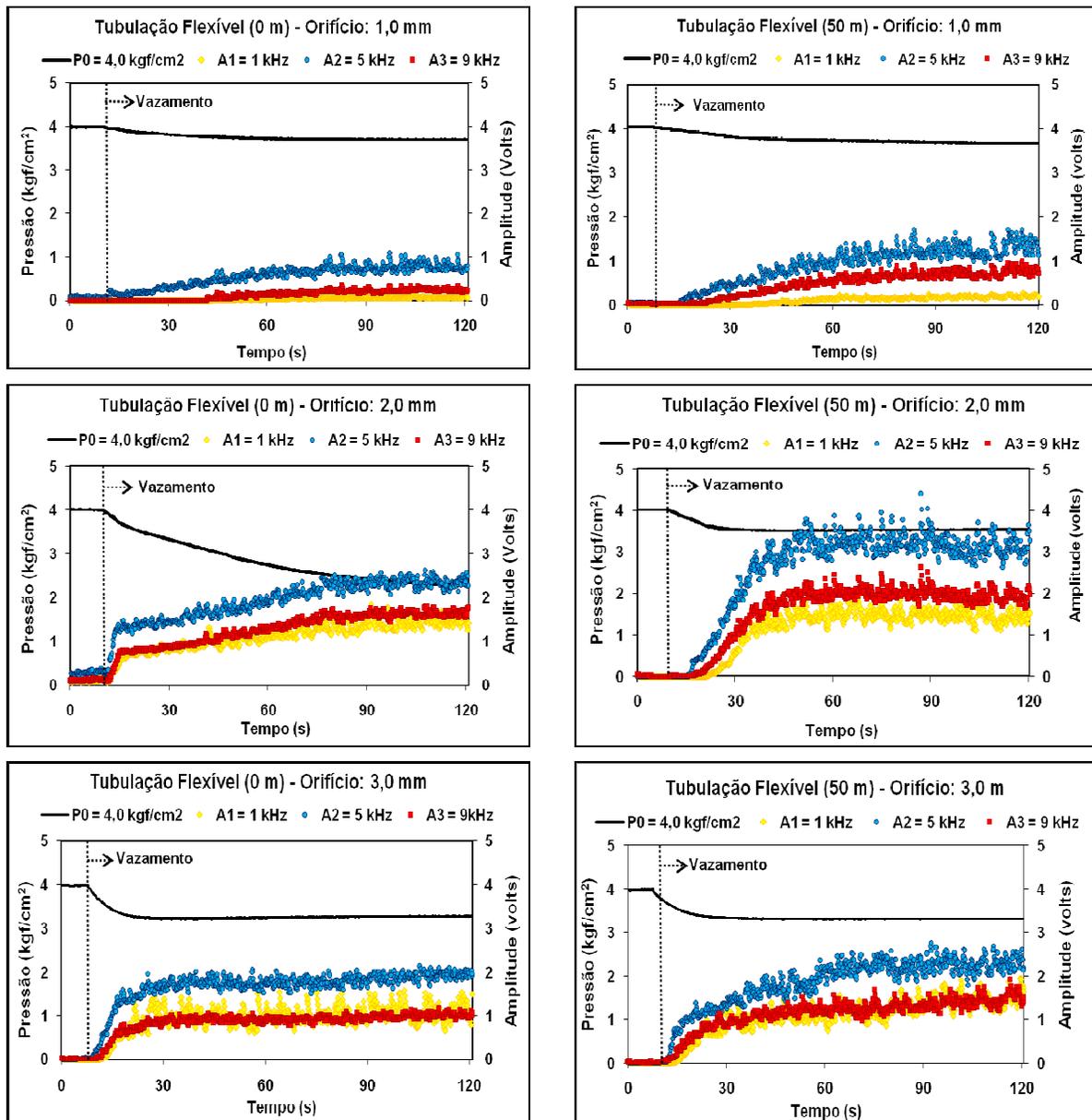
No momento em que o vazamento foi provocado, a pressão na tubulação sofreu um decréscimo do valor inicial em função do tempo. Este decréscimo da pressão depende do diâmetro do orifício do vazamento. Quanto maior o orifício de vazamento do gás maior o decréscimo da pressão. As frequências de 1 kHz, 5kHz e 9 kHz apresentaram uma variação em amplitude, aumentando o ruído sonoro e assim caracterizando a ocorrência de vazamento. Frequências abaixo de 1 kHz apresentam sons mais graves enquanto que frequências acima de 9 kHz apresentam sons mais agudos.

Em todos os casos a ocorrência de vazamento foi nitidamente detectada através dos perfis de transientes de pressão e das variações das amplitudes dos ruídos sonoros. De um modo geral, os valores das frequências em amplitude do ruído sonoro durante os experimentos foram maiores quando o diâmetro do orifício de vazamento era maior. Por isto foi necessário diminuir o ganho no banco de filtros passa faixa para que se pudesse fazer uma leitura correta do comportamento das variações da frequências em amplitude.

O ganho foi de 2 no circuito banco de filtros passa faixa para os experimentos realizados com orifícios de vazamento de 1,0 e 2,0 mm de diâmetro e para o orifício de vazamento de 3,0 mm de diâmetro, foi utilizado um ganho de 1 para que as frequências não ultrapassassem o valor máximo que a placa de aquisição A/D pode converter o ganho no circuito banco de filtros passa faixa.

Nas Figuras 4.4(b) a 4.6(b), a amplitude do ruído sonoro apresentou as variações das frequências em amplitude caracterizando a ocorrência do vazamento algum tempo depois do momento em que o vazamento foi provocado e não de imediato como observado nas Figuras 4.4(a) a 4.6(a). Isto ocorreu porque o ruído sonoro provocado pelo vazamento levou alguns segundos para percorrer os 50 m da tubulação flexível até chegar ao sensor acústico localizado no vaso de pressão.

A Figura 4.4 mostra os resultados experimentais para ambas as posições do vazamento, quando o mesmo foi provocado a 0 m e a 50 m do início da tubulação através dos orifícios de vazamento de 1,0, 2,0 e 3,0 mm, à pressão inicial de 2,0 kgf/cm². A ocorrência de vazamento provocou pouca alteração significativa no valor da pressão quando foi utilizado orifício de vazamento de 1,0 mm de diâmetro. Para os orifícios de 2,0 mm e 3,0 mm a queda de pressão foi brusca no momento em que a válvula de vazamento foi aberta e, em seguida, foi estabilizada. A frequência dominante foi de 5 kHz na Figura 4.4, indicando um som levemente grave.



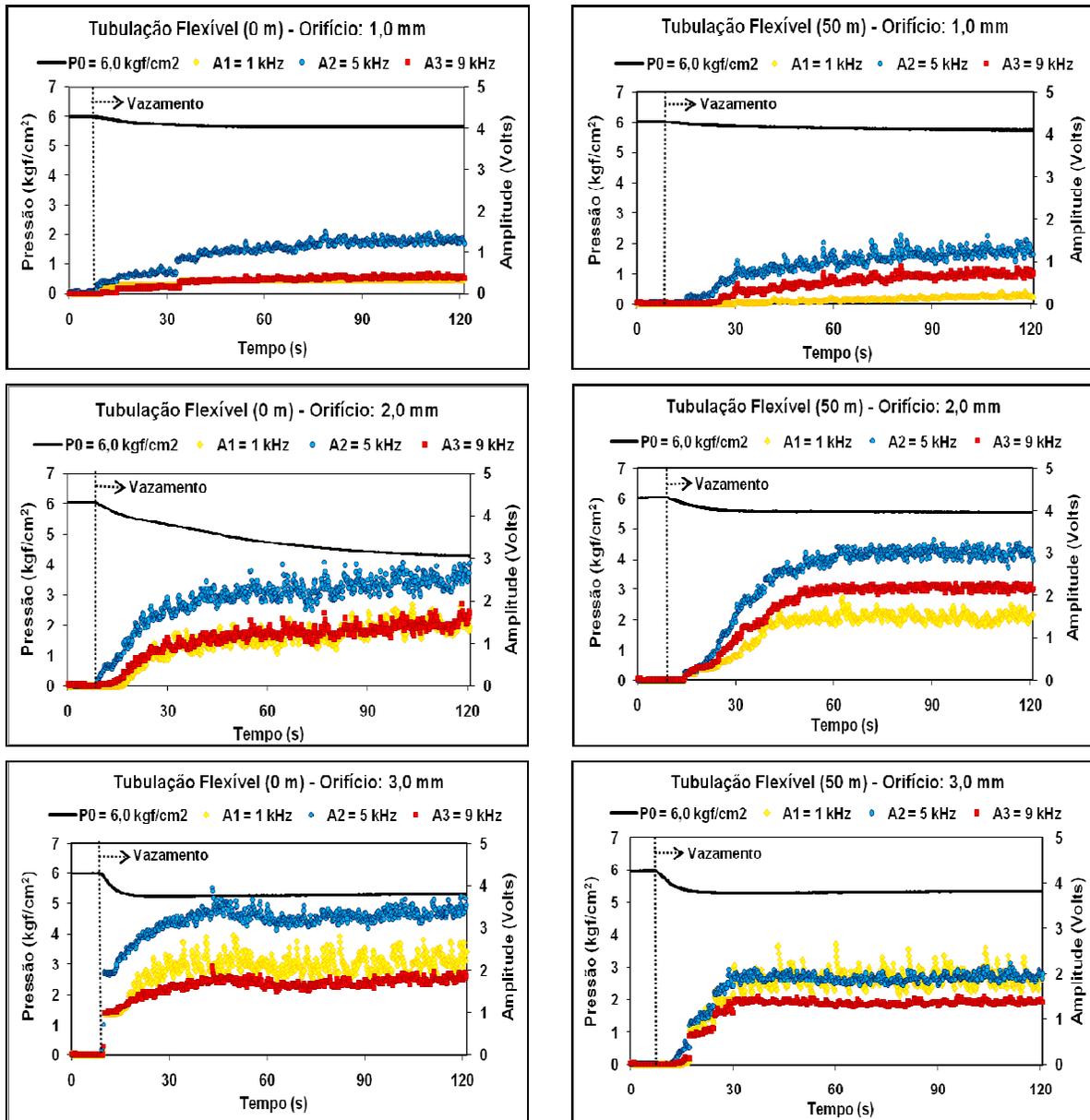
(a) Posição do Vazamento: 0 m

(b) Posição do Vazamento: 50 m

Figura 4.5 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro. $P_0 = 4,0 \text{ kgf/cm}^2$.

A pressão na tubulação sofreu uma redução no momento em que o vazamento foi provocado, no entanto, a característica dos perfis de transiente de pressão foram distintos variando o diâmetro do orifício de vazamento. A frequência dominante foi de 5 kHz, indicando um som grave. As frequências de 1 kHz e 9 kHz apresentaram um aumento em amplitude quando a magnitude do orifício foi maior.

A Figura 4.6 ilustra os resultados experimentais provocados para posições do vazamento de 0 m e a 50 m do início da tubulação através dos orifícios de vazamento de 1,0; 2,0 e 3,0 mm, à pressão inicial de 6 kgf/cm². Para orifícios de vazamentos de 1,0 e 2,0 mm foram utilizados ganho de 2 e para o orifício de vazamento de 3,0 mm de diâmetro, foi utilizado um ganho de 1 no banco de filtros passa faixa.



(a) Posição do Vazamento: 0 m

(b) Posição do Vazamento: 50 m

Figura 4.6 - Transientes de pressão e amplitude do ruído sonoro. P0 = 6,0 kgf/cm².

A frequência dominante foi de 5 kHz na Figura 4.6, indicando um som levemente grave. Observou-se que a amplitude da frequência de 1 kHz é menor que a frequência de 9 kHz para os orifícios de 1 e 2 mm, enquanto que para o orifício de 3,0 mm, a frequência de 1 kHz supera em amplitude a frequência de 9 kHz, indicando um som mais grave.

As variações das frequências em amplitude obtidas nos experimentos realizados com o vazamento a 50 m do microfone (Figuras 4.4(b) a 4.6(b)) apresentaram comportamentos diferentes em relação às variações das frequências em amplitude obtidas nos experimentos realizados com o vazamento no início da tubulação (Figuras 4.4(a) a 4.6(a)).

As amplitudes das frequências foram maiores quando o vazamento foi provocado a 50 m do sensor acústico. Este comportamento distinto da amplitude das frequências para vazamentos provocados no início da tubulação e a 50 m do início da tubulação ocorreu para quando foram utilizadas pressões iniciais de 2,0 e 4,0 kgf/cm². A onda sonora produzida pelo vazamento a 50 m distante do sensor acústico se propaga dentro da tubulação flexível e ao longo da tubulação ocorre a sobreposição linear das ondas sonoras, onde a amplitude em um ponto é a soma das amplitudes das ondas que se sobrepõem.

Observou-se também que para o vazamento provocado no início da tubulação flexível (Figuras 4.4(a) a 4.6(a)) para o mesmo orifício de vazamento a amplitude das frequências aumentou com o aumento das pressões. Enquanto que para o vazamento provocado a 50 metros do início da tubulação (Figuras 4.4(b) a 4.6(b)) para o mesmo orifício de vazamento a amplitude das frequências foi diminuindo com o aumento das pressões.

A onda sonora provocada pelo vazamento a 50 m do inicio da tubulação flexível viaja ao longo da tubulação contra o fluxo da pressão até ser detectado pelo microfone. Portanto, para o diâmetro de vazamento de 1,0 mm e 2,0 mm as amplitudes das frequências variaram após alguns segundos do vazamento ser provocado e foram levemente diminuídas com o aumento da pressão.

A variação dos transientes de pressão gerados pelo vazamento foi analisada para as diferentes pressões iniciais em relação à variação da magnitude de vazamento. A Tabela 4.3 apresenta o cálculo da porcentagem de vazamento para os orifícios de 1, 2 e 3 mm.

Tabela 4.3 – Cálculo da porcentagem de vazamento na Tubulação Flexível.

Tubulação Flexível					
Pressão: 2,0 (kgf/cm²)		Pressão: 4,0 (kgf/cm²)		Pressão 6,0 (kgf/cm²)	
Orifício (mm)	Porcentagem %	Orifício (mm)	Porcentagem %	Orifício (mm)	Porcentagem %
1,0	1,88	1,0	1,79	1,0	1,74
2,0	7,53	2,0	7,14	2,0	6,95
3,0	16,93	3,0	16,07	3,0	15,63

Podemos observar que a porcentagem de vazamento foi menor que 2% da vazão nominal quando o vazamento foi provocado pelo orifício de 1,0 mm, ou seja, a queda de pressão provocada no sistema pelo vazamento foi muito pequena. Para os vazamentos provocados com os orifícios de 2,0 e 3,0 mm a variação da pressão é maior, podendo detectar a presença de vazamento.

4.2 – Uso das redes neurais para localização e determinação da magnitude do vazamento.

Para o treinamento das redes neurais foram utilizados dados experimentais da pressão e dados das frequências sem e com a presença de vazamentos, tanto para a tubulação rígida quanto para a tubulação flexível. Os dados originais das frequências foram submetidos ao cálculo da média móvel com 40 pontos, com a finalidade de reduzir o ruído existente nos dados e facilitar o treinamento da rede neural. Como o sinal da pressão não apresentou ruídos significantes, não foi necessário usar filtros. Neste caso usou-se o valor pontual da pressão lido diretamente do transdutor.

4.2.1 – Tubulação Rígida

Para a tubulação rígida foram gerados primeiramente modelos neurais para determinar a ocorrência ou não de vazamento, bem como sua magnitude utilizando-se os experimentos utilizados na dissertação de mestrado (SOUSA, 2007) descritos no item 4.1.1. Para cada pressão um modelo neural independente foi gerado.

A Figura 4.7 apresenta os dados originais dos vazamentos juntamente com os dados da média móvel utilizados como entrada no modelo neural, para pressões iniciais de 4,0 e 6,0 kgf/cm² e orifício de vazamento de 3,0 mm. Os cálculos da média móvel e os dados utilizados como entrada na rede neural estão apresentados no Apêndice D.

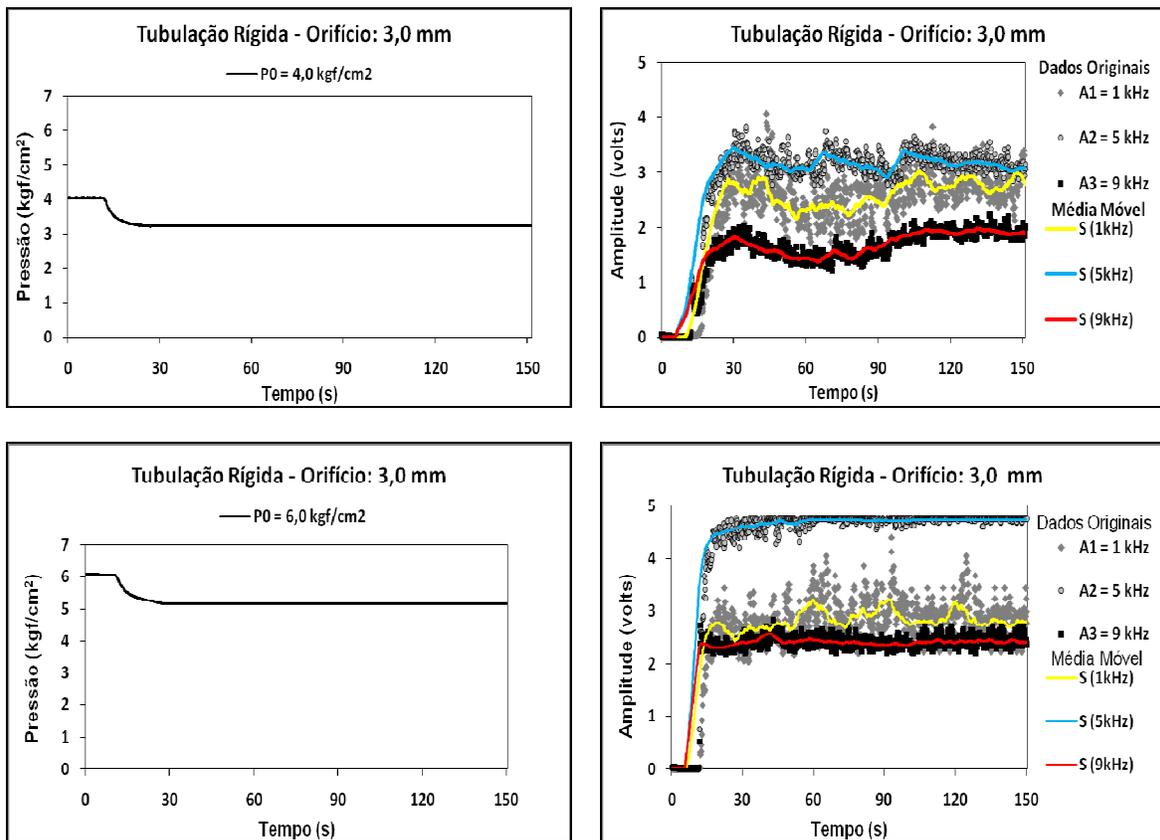


Figura 4.7 – Transiente de pressão, variação da amplitude do ruído sonoro e média móvel.

Para analisar a melhor configuração dos modelos neurais, foram realizados vários testes off-line, com dados não vistos no treinamento, observando os gráficos de dispersão (dados reais versus dados preditos) e selecionando as configurações dos modelos neurais que apresentaram melhor resposta.

Com o objetivo de confirmar a topologia mais adequada para este banco de dados foram realizados testes com duas camadas intermediárias na estrutura da rede para as pressões iniciais de 2,0; 3,0 e 4,0 kgf/cm². Para as pressões iniciais de 5,0 e 6,0 kgf/cm² foram realizados testes com uma camada intermediária na estrutura da rede. A Tabela 4.4 apresenta as configurações das RNAs escolhidas para cada pressão.

Tabela 4.4 – Configuração da RNA escolhida para a Tubulação Rígida.

P0 (kgf/cm²)	Topologia RNA	Função Transferência (camadas intermediárias)	SSE (treinamento)	$\sqrt{\text{MSE}}$ (mm)	Número de parâmetros efetivos
2,0	13x15x15x1	Tansig	0,0095	$1,35 \cdot 10^{-3}$	283
3,0	13x16x13x1	Tansig	0,0093	$1,34 \cdot 10^{-3}$	311
4,0	13x17x15x1	Tansig	0,0099	$1,38 \cdot 10^{-3}$	245
5,0	13x13x1	Tansig	0,0092	$1,33 \cdot 10^{-3}$	222
6,0	13x15x1	Tansig	0,0093	$1,34 \cdot 10^{-3}$	208

Os somatórios dos erros quadrados (SSE) dos treinamentos dos modelos neurais desenvolvidos para as pressões iniciais de 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 e 6,0 kgf/cm² com vazamento no início da tubulação, foram de aproximadamente 10^{-2} , conseqüentemente as raízes quadradas do MSE (erro médio quadrado) apresentaram valores menores que 0,1 mm, conforme Tabela 4.4, sendo consideradas aceitáveis.

Para comprovar o desempenho satisfatório dos modelos neurais desenvolvidos foram apresentados em forma de gráfico os dados experimentais (erro-mm) versus o número de vetores de dados para testar o modelo. Foram utilizados 400 vetores de dados para os modelos neurais para vazamento na tubulação rígida.

4 – Resultados e Discussão

A Figura 4.8 mostra o erro em mm versus o número de vetores realizado para as pressões de 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 e 6,0 kgf/cm².

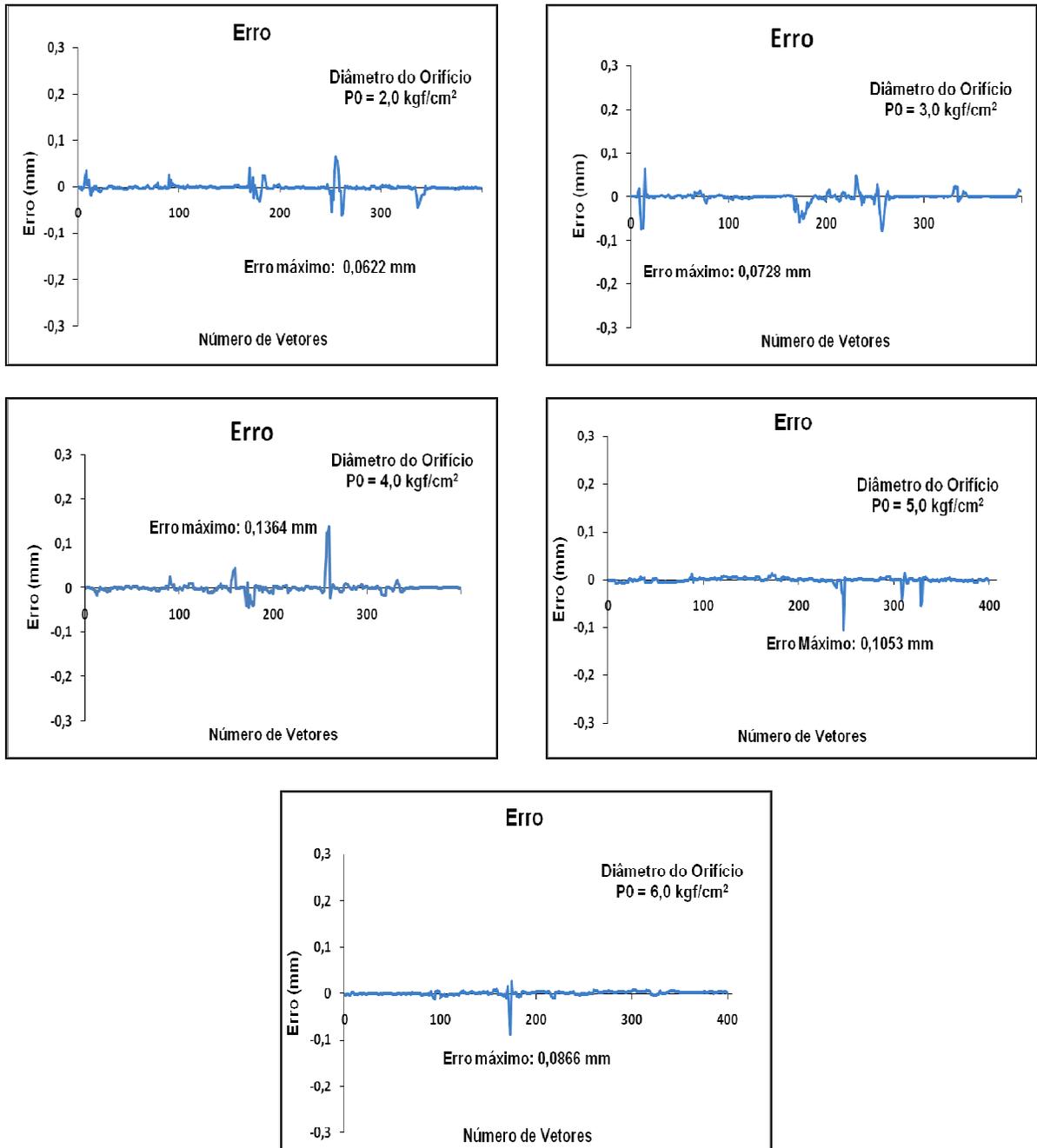


Figura 4.8 – Diferença entre dados reais e dados calculados pelos modelos neurais versus o número de vetores utilizando tubulação rígida

A Tabela 4.5 apresenta os maiores erros dos modelos neurais obtidos de cada teste off-line na tubulação rígida para determinar a magnitude dos vazamentos em relação ao tamanho real do vazamento, nas cinco pressões utilizadas. Verificou-se que o ajuste das redes neurais foi satisfatório para as pressões utilizadas, pois o erro máximo absoluto obtido para os modelos neurais foi para pressão inicial de $3,0 \text{ kgf/cm}^2$, que corresponde a 7,3%.

Considerando que os dados de saída apresentados à rede neural se constituíam de números inteiros da medida em milímetros, efetuou-se o arredondamento da coluna da saída da rede neural, e verificou-se que desta forma são anulados todos os erros ocorridos.

Tabela 4.5 – Maiores erros obtidos dos modelos neurais para determinar o tamanho do vazamento.

Tubulação Rígida					
Pressão (kgf/cm²)	Tamanho Real (mm)	Saída RNA (mm)	Erro (mm)	Erro Relativo (%)	Saída RNA com arredondamento (mm)
2,0	4,0	3,9378	0,0622	1,6	4,0
3,0	1,0	0,9272	0,0728	7,3	1,0
4,0	4,0	4,1364	0,1364	3,4	4,0
5,0	4,0	3,8947	0,1053	2,6	4,0
6,0	3,0	2,9134	0,0866	2,9	3,0

Posteriormente, com o objetivo de determinar simultaneamente a ocorrência do vazamento, a localização e a magnitude do vazamento foram realizados testes off-line na tubulação rígida para a pressão inicial de $6,0 \text{ kgf/cm}^2$ com vazamentos localizados a 0 m e a 3 m do início da tubulação, mostrados graficamente na Figura 4.2.

A Figura 4.9 apresenta os dados originais dos vazamentos juntamente com os dados da média móvel utilizados como entrada no modelo neural, para pressão inicial de $6,0 \text{ kgf/cm}^2$ e orifício de vazamento de 2,0 mm, para vazamentos provocados a 0 m e a 3 m do início da tubulação.

4 – Resultados e Discussão

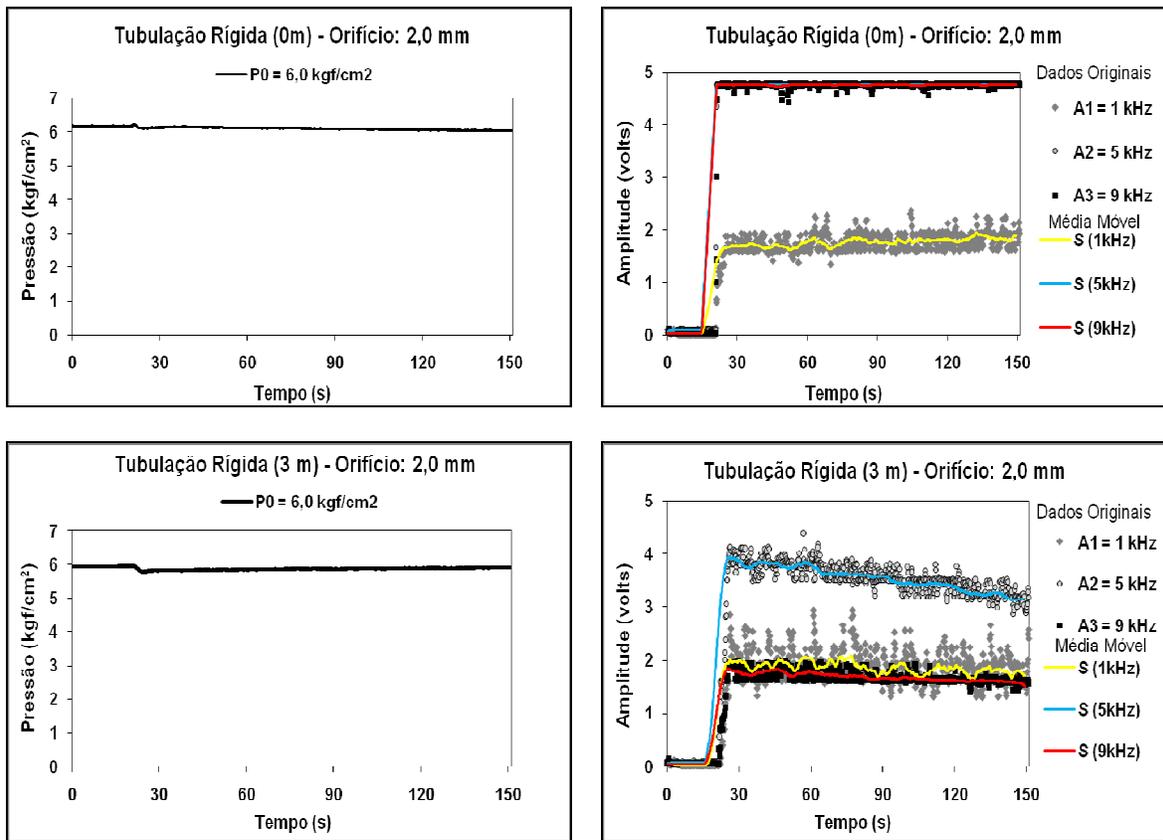


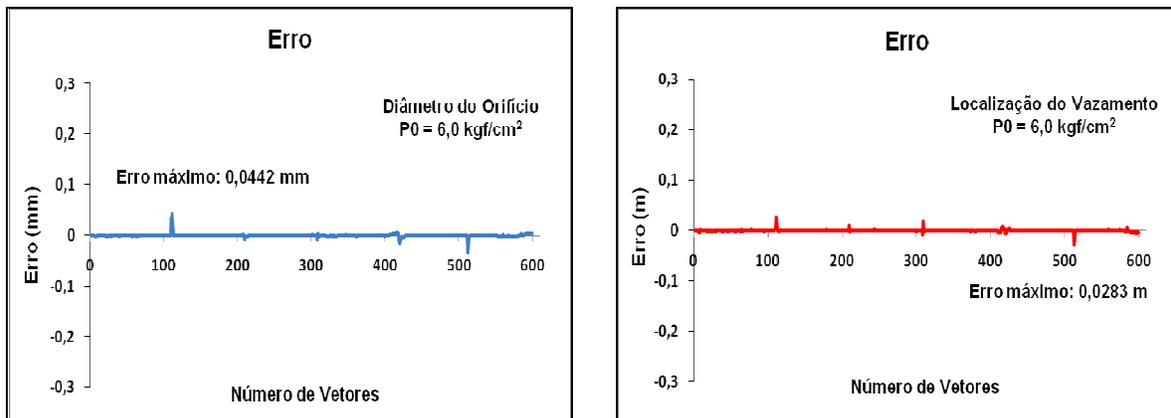
Figura 4.9 – Transiente de pressão, variação da amplitude do ruído sonoro e média móvel.

A Tabela 4.6 ilustra a configuração do modelo neural que apresentou a melhor topologia com uma camada intermediária. O SSE de treinamento do modelo neural desenvolvido foi aproximadamente 10^{-2} , consequentemente as raízes quadradas do MSE (erro médio quadrado) apresentaram valores menores que 0,1 mm, sendo consideradas aceitáveis.

Tabela 4.6 – Configuração da RNA escolhida para a Tubulação Rígida.

P0 (kgf/cm ²)	Topologia RNA	Função Transferência (camadas intermediárias)	SSE (treinamento)	$\sqrt{\text{MSE}}$ (mm)	Número de parâmetros efetivos
6,0	13x13x2	Tansig	0,0084	$1,04 \cdot 10^{-3}$	285

A Figura 4.10 representa o erro da diferença entre os dados calculados pela rede neural e os dados experimentais. Na Figura 4.10(a) o erro entre os dados calculados pela rede neural e os dados experimentais da magnitude do orifício, foram expressos em milímetros e na Figura 4.10(b) o erro entre os dados calculados pela rede neural e os dados experimentais da localização do vazamento foram expressos em metros. Foram utilizados 600 vetores de dados para testar o modelo



(a) Magnitude do vazamento

(b) Localização do vazamento

Figura 4.10 – Diferença entre dados reais e dados calculados pelos modelos neurais versus o número de vetores de dados teste para a pressão inicial de 6,0 kgf/cm², utilizando tubulação rígida

O erro máximo ocorrido na Figura 4.10(a) foi para um vazamento com orifício de 1,0 mm, apresentando um erro relativo de 4,4%. Para a Figura 4.10(b) o erro máximo relativo foi de 0,94 % para vazamento ocorrido a 3 m do início da tubulação. A Tabela 4.7 apresenta os maiores erros de cada teste off-line na tubulação rígida para determinar a magnitude do orifício de vazamento e sua localização em relação ao tamanho real do vazamento e sua real localização.

De acordo com a Tabela 4.7, observou-se que os modelos neurais apresentaram erros menores que 5% para a magnitude do vazamento e erros menores que 1% para a localização do vazamento e, quando transformados em números inteiros apresentaram 100% de acerto no tamanho do vazamento provocado e em sua localização.

Tabela 4.7 – Maiores erros obtidos dos modelos neurais para determinar o tamanho e a localização do vazamento.

Tubulação Rígida – P0 = 6,0 kgf/cm²				
Tamanho Real (mm)	Saída RNA (mm)	Erro (mm)	Erro Relativo (%)	Saída RNA com arredondamento (mm)
1,0	1,0442	0,0442	4,4	1,0
1,0	1,0338	0,0338	3,4	1,0
3,0	2,9663	0,0337	1,1	3,0
Localização Real (m)	Saída RNA (m)	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Saída RNA com arredondamento (m)
3,0	2,9717	0,0283	0,94	3,0
3,0	3,0265	0,0265	0,88	3,0
3,0	2,9823	0,0177	0,60	3,0

Considerando também que os dados de saída apresentados à rede neural se constituíam de números inteiros da medida em milímetros para a magnitude do vazamento e ou em metros para a localização do vazamento, efetuou-se o arredondamento da coluna da saída da rede neural, anulando assim todos os erros ocorridos.

O modelo neural atual que utiliza como entrada o sinal da pressão juntamente com os três sinais de frequência apresentou erros relativos menores quando comparado ao modelo neural utilizado por SANTOS (2011) sob as mesmas condições de pressão e posição do vazamento. Nos testes off-line apresentados por SANTOS (2011), os erros máximos relativos no modelo neural para determinar a magnitude do vazamento e a sua localização foram respectivamente 5,22% e 37,54%.

O modelo atual apresentou um bom desempenho, caracterizando com alta precisão a predição da magnitude do vazamento e sua localização. Isto se aplica pelo fato de que são usadas informações que se complementam, ou seja, nas situações em que os sinais sonoros são indistinguíveis, o sinal de pressão é diferente e para situações nas quais a pressão não “sente” o vazamento, o sinal sonoro o acusa. A rede neural, por ser multivariável aprende adequadamente a interpretar estas situações.

4.2.2 – Tubulação Flexível

Foi gerado um modelo neural independente para cada pressão com o objetivo de determinar a ocorrência do vazamento, bem como a localização e a magnitude do vazamento simultaneamente. Foram realizados, portanto, treinamentos das redes neurais utilizando-se pressões de 2,0, 4,0 e 6,0 kgf/cm², com vazamentos localizados em posições distintas e orifícios de vazamentos de magnitudes variados. Estes dados são os mostrados nas Figuras 4.4 a 4.6.

A Figura 4.11 apresenta os dados originais dos vazamentos juntamente com os dados da média móvel utilizados como entrada no modelo neural, para pressão inicial de 4,0 kgf/cm² e orifício de vazamento de 2,0 mm, para vazamentos provocados a 0 m e a 50m do início da tubulação.

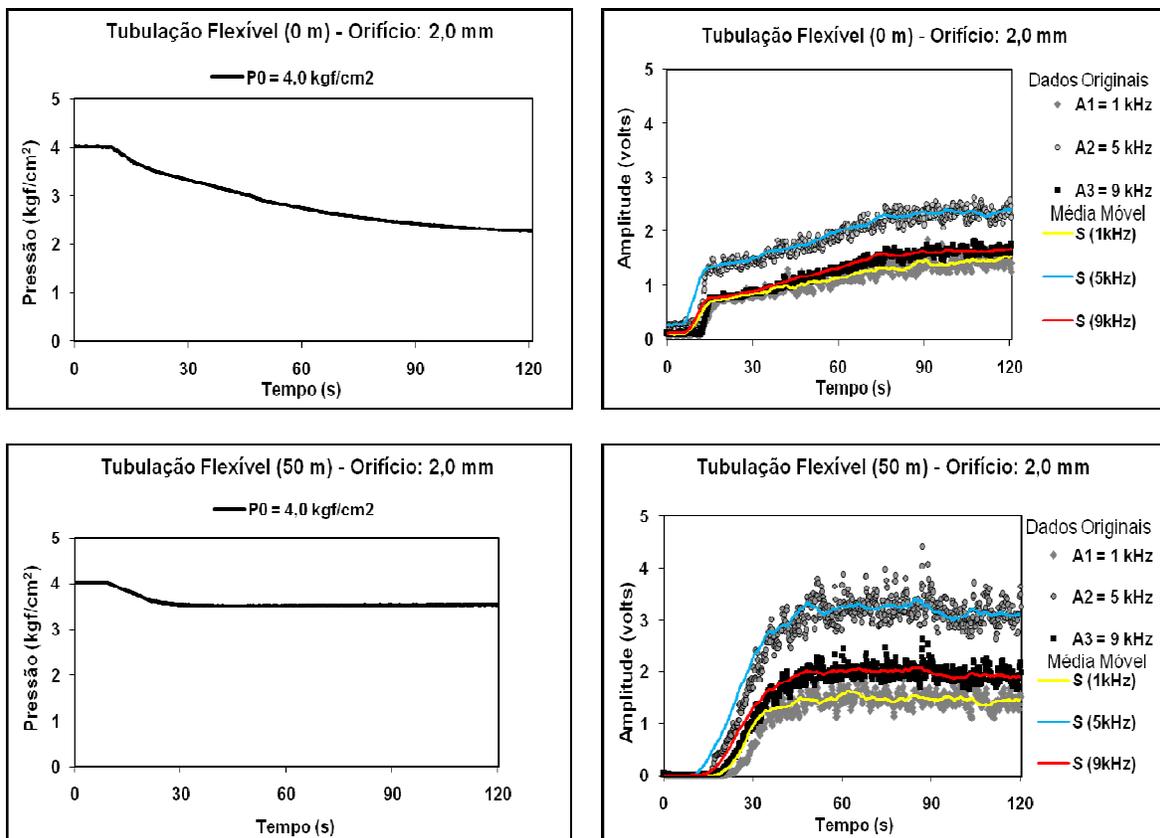


Figura 4.11 – Transiente de pressão, variação da amplitude do ruído sonoro e média móvel.

Para obter a melhor configuração dos modelos neurais foram realizados vários testes off-line, observando-se os dois gráficos de dispersão: da localização e da magnitude do vazamento. A Tabela 4.8 ilustra as configurações dos modelos neurais escolhidos que apresentaram melhor resposta. O número de camadas e neurônios em cada camada variou em todas as situações testadas. Para pressões iniciais de 2,0 e 4,0 kgf/cm² foram utilizadas duas camadas intermediárias e para a pressão inicial de 6,0 kgf/cm² foram utilizadas três camadas intermediárias.

Tabela 4.8 – Configurações das RNAs escolhidas para cada pressão na Tubulação Flexível.

P0 (kgf/cm²)	Topologia RNA	Função Transferência (camadas intermediárias)	SSE (treinamento)	$\sqrt{\text{MSE}}$ (mm)	Número de parâmetros efetivos
2,0	13x15x13x2	Tansig	0,0099	$1,13 \cdot 10^{-3}$	513
4,0	13x19x13x2	Tansig	0,0088	$1,06 \cdot 10^{-3}$	541
6,0	13x16x16x13x2	Tansig	0,0094	$1,10 \cdot 10^{-3}$	566

Conforme Tabela 4.8 apresentada, o número de camadas e neurônios em cada camada variou em todas as situações testadas. Os somatórios dos erros quadrados (SSE) dos treinamentos dos modelos neurais desenvolvidos para estas pressões foram de aproximadamente 10^{-2} , conseqüentemente as raízes quadradas do MSE (erro médio quadrado) apresentaram valores menores que 0,1 mm, conforme Tabela 4.8, sendo consideradas aceitáveis.

As Figuras 4.12 a 4.14 representam o erro da diferença entre os dados calculados pela rede neural e os dados experimentais, comprovando o desempenho satisfatório dos modelos neurais desenvolvidos. A abscissa dos gráficos representa que foram utilizados 600 vetores de dados para testar o modelo.

Para as Figuras 4.12(a) a 4.14(a), os erros entre os dados calculados pela rede neural e os dados experimentais da magnitude do orifício foram expressos em milímetros e para as Figuras 4.12(b) a 4.14(b) os erros entre os dados calculados pela rede neural e os dados experimentais da localização do vazamento foram expressos em metros.

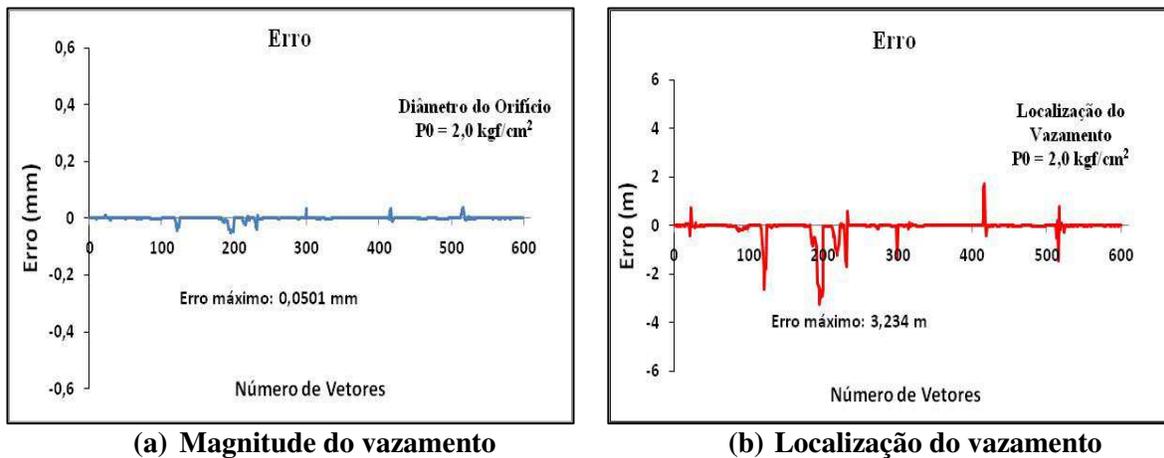


Figura 4.12 – Diferença entre dados reais e dados calculados pelos modelos neurais versus o número de vetores de dados teste para a pressão inicial de 2,0 kgf/cm².

À pressão inicial de 2,0 kgf/cm², a Figura 4.12(a) apresentou um erro máximo absoluto de 0,0501 mm no momento em que ocorria vazamento de magnitude de 1,0 mm, o que corresponde a um erro de 5% em relação a magnitude real do orifício de vazamento. Para a Figura 4.12(b) o erro máximo absoluto foi de 3,234 m no momento em que ocorria vazamento localizado a 50 m do início da tubulação, o que corresponde a um erro de 6,47% em relação a posição real do vazamento.

Utilizando-se agora uma pressão inicial de 4,0 kgf/cm² (Figura 4.13(a)) o erro máximo absoluto foi de 0,032 mm no momento em que ocorria vazamento de magnitude de 2,0 mm, o que corresponde a um erro de 1,58% em relação a magnitude real do orifício de vazamento. Para a Figura 4.13(b) o erro máximo absoluto foi de 2,063 m no momento em que ocorria vazamento localizado a 50 m do início da tubulação, o que corresponde a um erro de 4,13% em relação a posição real do vazamento.

4 – Resultados e Discussão

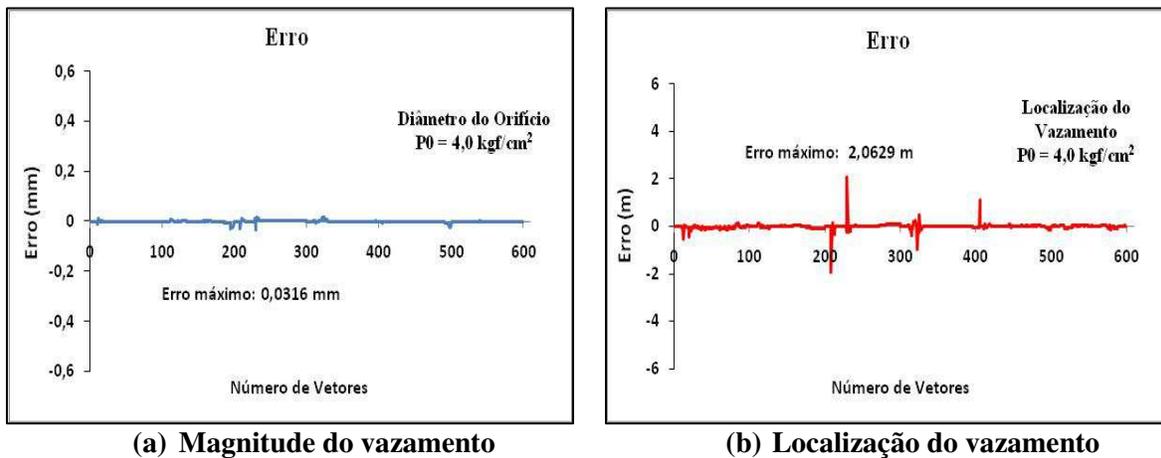


Figura 4.13 - Diferença entre dados reais e dados calculados pelos modelos neurais versus o número de vetores de dados teste para a pressão inicial de 4,0 kgf/cm².

À pressão inicial de 6,0 kgf/cm², a Figura 4.14(a) apresentou um erro máximo absoluto de 0,031 mm no momento em que ocorria vazamento de magnitude de 2,0 mm, o que corresponde a um erro de 1,54% em relação a magnitude real do orifício de vazamento. Para a Figura 4.14(b) o erro máximo absoluto foi de 0,681 m no momento em que ocorria vazamento localizado a 50 m do início da tubulação, o que corresponde a um erro de 1,36% em relação a posição real do vazamento.

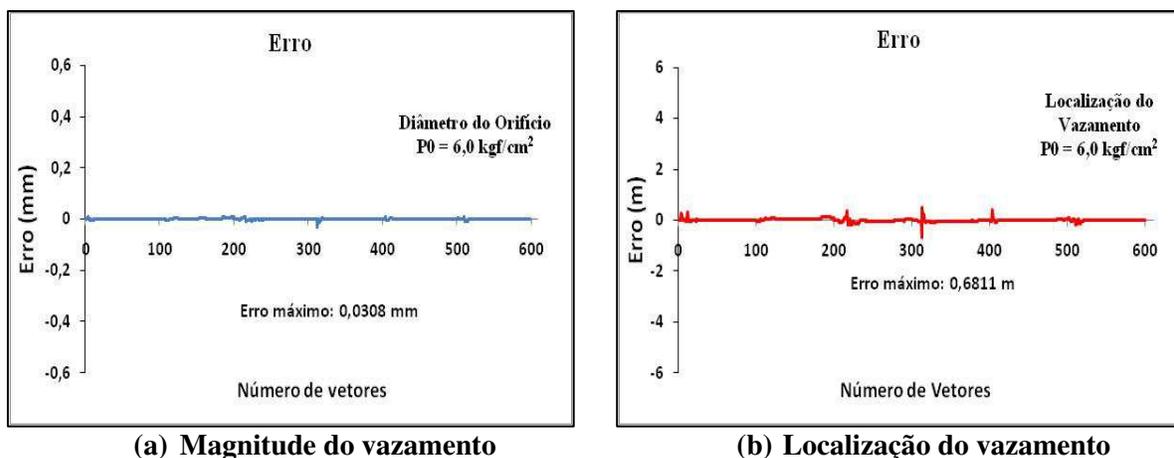


Figura 4.14 - Diferença entre dados reais e dados calculados pelos modelos neurais versus o número de vetores de dados teste para a pressão inicial de 6,0 kgf/cm².

Os maiores erros obtidos nos modelos neurais ocorreram na fase transiente, ou seja, na fase em que houve a perturbação (vazamento) no sistema. As Tabelas 4.9 a 4.11 apresentam os maiores erros de cada teste off-line na tubulação flexível, obtidos da aplicação dos modelos para determinação da magnitude do vazamento e sua localização em relação ao tamanho o real do vazamento e a sua localização real, respectivamente, nas três pressões utilizadas.

Efetuuou-se o arredondamento da coluna da saída da rede neural, e percebeu-se um bom desempenho do modelo neural caracterizando com alta precisão a predição do tamanho do vazamento e a predição da localização do mesmo com um erro máximo de 3 m.

Tabela 4.9 – Erros obtidos dos modelos neurais para determinar o tamanho do vazamento e sua localização na tubulação flexível a pressão de 2,0 kgf/cm².

Tubulação Flexível - Pressão 2,0 kgf/cm²				
Tamanho Real (mm)	Saída RNA (mm)	Erro (mm)	Erro Relativo (%)	Saída RNA com arredondamento (mm)
1,0	0,9499	0,0501	5,0	1,0
1,0	0,956	0,0440	4,4	1,0
1,0	0,9575	0,0425	4,3	1,0
Localização Real (m)	Saída RNA (m)	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Saída RNA com arredondamento (m)
50	46,766	3,234	6,5	47
50	47,060	2,940	5,9	47
50	47,349	2,651	5,3	47

Tabela 4.10 – Erros obtidos dos modelos neurais para determinar o tamanho do vazamento e sua localização na tubulação flexível a pressão de 4,0 kgf/cm².

Tubulação Flexível - Pressão 4,0 kgf/cm²				
Tamanho Real (mm)	Saída RNA (mm)	Erro (mm)	Erro Relativo (%)	Saída RNA com arredondamento (mm)
1,0	0,9731	0,0269	2,7	1,0
1,0	0,9758	0,0242	2,4	1,0
2,0	1,9684	0,0316	1,5	2,0
Localização Real (m)	Saída RNA (m)	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Saída RNA com arredondamento (m)
0	2,063	2,063	4,1	2,0
50	49,045	0,955	1,9	50
50	49,897	0,103	0,2	50

Tabela 4.11 – Erros obtidos dos modelos neurais para determinar o tamanho do vazamento e sua localização na tubulação flexível a pressão de 6,0 kgf/cm².

Tubulação Flexível - Pressão 6,0 kgf/cm²				
Tamanho Real (mm)	Saída RNA (mm)	Erro (mm)	Erro Relativo (%)	Saída RNA com arredondamento (mm)
2,0	1,9692	0,0308	1,54	2,0
2,0	1,9867	0,0133	0,7	2,0
2,0	1,9904	0,0096	0,5	2,0
Localização Real (m)	Saída RNA (m)	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Saída RNA com arredondamento (m)
50	49,319	0,681	1,4	49
50	49,529	0,471	1,0	50
50	49,779	0,221	0,4	50

Conforme resultados apresentados nesta seção, os modelos neurais apresentaram 100% de acerto na detecção, ou seja, apresentaram comportamentos semelhantes do real. Para as três situações de pressões testadas os modelos neurais conseguiram prever adequadamente a magnitude e a localização dos vazamentos. As Tabelas 4.9 a 4.11 mostraram que o erro relativo diminuiu em função do aumento da pressão tanto para a magnitude do vazamento, como para a localização do vazamento. O modelo apresentou um bom desempenho, com erros iguais e inferiores a 5% para a magnitude do vazamento e inferiores a 7% para a localização do vazamento.

Novamente, o modelo neural atual que totaliza 13 entradas, apresentou erros relativos menores quando comparado ao modelo neural utilizado por SANTOS (2011) sob as mesmas condições de pressão e posição do vazamento para a tubulação flexível.

Nos testes off-line apresentados por SANTOS (2011), o erro máximo relativo no modelo neural para determinar a magnitude do vazamento a uma pressão inicial de 6,0 kgf/cm² foi de 26,3 %. Enquanto que para o modelo atual os erros máximos relativos para determinar a magnitude do vazamento foram iguais ou inferiores a 5%.

Desta forma, conclui-se que quando o sensor sonoro não capta, o transdutor de pressão capta e vice-versa. A RNA por ser não linear e multivariável mapeia adequadamente as informações obtidas ao longo do tempo.

5 . CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nos últimos anos, técnicas de detecção e de localização de vazamentos em redes de tubulações vêm sendo implantadas com a finalidade de aumentar a confiabilidade operacional e reduzir significativamente o impacto ambiental.

O presente trabalho constituiu em detectar vazamentos em uma tubulação rígida ou flexível operando com alimentação contínua de ar baseado na análise dos transientes de pressão e amplitudes dos ruídos sonoros gerados a partir do vazamento visando a localização e a determinação da magnitude dos vazamentos através da utilização das redes neurais artificiais.

Os equipamentos utilizados para a detecção de vazamento foram o transdutor de pressão e o microfone localizados no interior do vaso de pressão que estavam acoplados a um computador PC através de uma placa conversora ADA. A pressão interna do sistema variou de 2 a 6 kgf/cm², o diâmetro do orifício (magnitude do vazamento) variou de 1,0 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

Foi comprovado experimentalmente que, no instante que o vazamento foi provocado, a pressão na tubulação sofreu um decréscimo do valor inicial em função do tempo e um ruído sonoro foi gerado. As frequências que compõem esse ruído variaram com o diâmetro do orifício, com a localização do vazamento e com a pressão no interior do sistema vaso de pressão-tubulação.

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. Porém o comportamento das frequências em amplitude foi distinto para os vazamentos provocados na tubulação rígida e vazamentos provocados nos dois pontos da tubulação flexível.

Para o treinamento das redes neurais foram utilizados dados experimentais da pressão e das frequências sem e com a presença de vazamentos, tanto para a tubulação flexível quanto para a rígida. Para cada pressão um modelo neural independente foi gerado.

Percebeu-se que foi possível determinar a ocorrência, a magnitude e a localização do vazamento através de redes neurais artificiais, pois para todas as situações off-line testadas de pressão inicial do sistema, os modelos conseguiram prever adequadamente os vazamentos provocados de 1,0 mm; 2,0 mm; 3,0 mm; 4,0 mm e 5,0 mm de diâmetro.

Para a tubulação rígida, foi utilizada uma pressão inicial de 6,0 kgf/cm² com vazamentos localizados a 0 m e a 3 m do início da tubulação. O modelo atual apresentou um bom desempenho, caracterizando com alta precisão a predição da magnitude do vazamento e sua localização, pois os modelos neurais apresentaram 100% de acerto na detecção do vazamento, um erro máximo absoluto de 4,4% na magnitude do vazamento e de 0,94% para a localização do vazamento.

Para todas as condições de operação na tubulação flexível, os modelos neurais apresentaram 100% de acerto na detecção do vazamento, erros iguais ou inferiores a 5% para a magnitude do vazamento e erros inferiores a 7% para a localização do vazamento.

Logo, pode-se notar que os modelos neurais desenvolvidos para a tubulação flexível e rígida com o objetivo de detectar e localizar simultaneamente o vazamento apresentaram um resultado satisfatório, indicando, portanto, a potencialidade do modelo neural. Isto se deve pelo fato de que as informações se complementam, ou seja, nas situações em que os sinais sonoros são indistinguíveis, o sinal de pressão é diferente e para situações nas quais a pressão não “sente” o vazamento, o sinal sonoro o acusa. A rede neural, por ser multivariável aprende adequadamente a interpretar estas situações.

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 e da utilização das redes neurais artificiais, sugere-se:

- Desenvolver um novo sistema experimental de tubulação implantando sensores acústicos ao longo da tubulação, ou seja, implantar sensores acústicos antes e após a posição do vazamento, a fim de obter mais informações sobre o comportamento das frequências quando as ondas sonoras estiverem a favor e contra o fluxo de pressão;
- Implantar medidores de vazão e transdutores de pressão ao longo do novo sistema experimental da tubulação a fim de determinar a vazão real de gás (ar comprimido), bem como quantificar e expressar em valor monetário a perda de gás em função do vazamento;
- Utilizar os dados obtidos do novo sistema experimental como entrada na rede neural, melhorando a precisão e o desempenho dos modelos neurais preditivos;
- Desenvolver um sistema de detecção e localização de vazamento em tubulações utilizando redes neurais artificiais não supervisionadas;
- Analisar o desempenho do sistema neural para testes on-line utilizando o novo sistema experimental para predição da magnitude e localização do vazamento;
- Desenvolver um sistema supervisorio que possa atuar nas válvulas presentes na tubulação logo que o vazamento seja detectado e localizado através de redes neurais artificiais;
- 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 e;
- Desenvolver um novo sistema experimental de tubulação que contenham ramificações (sistema de distribuição de gases) a fim de analisar o comportamento

5 – Conclusões e Sugestões

das frequências e a predição da localização do vazamento utilizando redes neurais artificiais.

6 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAGHDADI, A.H.A., MANSY, H.A. A mathematical model for leak location in pipelines. *Applied Mathematical Modelling*, vol.12, n.2, 1988.
- 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*. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, 2001. Dissertação de Mestrado.
- BRAGA, A. P., CARVALHO, A. P. L. F., LUDERMIR, T.B. *Redes Neurais Artificiais*. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2007.
- BUIATTI, C. M. *Monitoramento de tubulações por técnicas computacionais on-line*. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, 1995. Dissertação de Mestrado.
- CAMERINI, D. A. *Desenvolvimento de Pigs Instrumentados para Detecção e Localização de Pequenos Vazamentos em Dutos*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004. Dissertação de Mestrado.
- CAPUTO, A. A., PELAGAGGE, P.M. An inverse approach for piping networks monitoring. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v.15, p. 497–505, 2002.

6 – Referências Bibliográficas

- CAPUTO, A. A., PELAGAGGE, P.M. Using Neural Networks to Piping Systems. *Process Safety Progress*, v. 22, n. 2, June 2003.
- CARIATI, S. A. *Detecção de vazamentos por computador “on-line” em tubulações transportando líquido e misturas gás-líquido*. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, 1999. Dissertação de Mestrado.
- CARRILLO, A. GONZALES, E. ROSAS, A. MARQUES, A. New distributed optical sensor for detection and localization of liquid leaks Part I. Experimental studies. *Sensors and Actuators A* 99. 229–235, 2002.
- CHAUDRY, M. H. *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Company, *Litton Educational Publishing*, p. 1-73, 1979.
- CHURCHILL, S. W. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. *Chemical Engineering*, v. 84, n. 24, p. 91-92, nov.7, 1977.
- DELMÉE, G. J. *Manual de medição de vazão*. São Paulo, *Editores 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.
- FILETI, A. M. F.. *Controle em Destilação Batelada: Controle Adaptativo e Controle Preditivo com Modelo Baseado em Redes Neurais Artificiais*. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1995. Tese de Doutorado.
- FOX, R.W., McDONALD, A.T. *Introdução à mecânica dos fluidos*. Quarta edição, LTC Editora, 1997.
- FUJIKI, T. L. *Desenvolvimento de Controlador Digital Baseado em um Modelo Neural e um Otimizador de uma Planilha Eletrônica*. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2009. Dissertação de Mestrado.

- FUKUSHIMA, K., MAESHIMA, R., KINOSHITA, A., SHIRAISHI, H., KOSHIJIMA, I. Gas pipeline leak detection system using the online simulation method. *Computers and Chemical Engineering, Gas Engineer's Handbook*, v. 24, n.2-7, p.453-456, 2000.
- GARCIA, F. M, QUADRI, R.A., MACHADO, R. A.F. e BOLZAN, A. Desenvolvimento de uma rede neural artificial para a detecção de vazamentos em uma seção de duto industrial. XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2010, p. 5745-5753.
- HAYKIN, S. *Redes Neurais – Princípios e Práticas*. Porto Alegre – RS – Brasil: *Bookman*, 2001.
- KHULIEF, Y.A, EMARA-SHABAİK, H.E. Laboratory investigation of a multiple-model state estimation scheme for detection and isolation of leaks in pipelines. *Proc. IMechE Vol. 220 Part I: J. Systems and Control Engineering*, 2006.
- KIM, M.S, LEE, S.K. Detection of leak acoustic signal in buried gas pipe based on the time–frequency analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, 990–994, 2009.
- LUDWIG, E.E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, v.1, Third Edition, *Gulf Publishing Company*, USA, 1995, Cap 1 e 2.
- MACIAS, I. B. *Detecção de vazamentos em Tubulações Transportando Gás*. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2007. Dissertação de Mestrado.
- MACLEOD, I. D., ROWLEY, R., BEESLEY, M. J., OLLEY, P. Acoustic monitoring techniques for structural integrity. *Nuclear Engineering and Design*, v.129, p. 191-200, 1991.
- MOROZOV, S.A., KOVTUN, S.N., BUDARIN, A.A., DVORNIKOV, P.A., KURDRYAEV, A.A., KONDRATOVICH, F.V., SHUTOV, P.S., SHVETSOV, D.M., KONOPLEV, N.P. Development of Acoustic Leak Monitoring System. *Atomic Energy*, vol. 103, no 6: 925 - 931, 2007.

6 – Referências Bibliográficas

- MUGGLETON, J.M., BRENNAN, M.J. Leak noise propagation and attenuation in submerged plastic water pipes. *Journal of Sound and Vibration* 278, 527–537, 2004.
- NAVES, G. J. *Técnicas de computação em tempo real em controle e supervisão de tubulações*. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, 1991. Dissertação de Mestrado.
- OOSTHUIZEN, P. H., CARSCALLEN, W. E. *Compressible Fluid Flow*, McGraw-Hill, USA, 1997. Cap. 3 e 9.
- PACIANOTTO, T. A. *Aplicação de Redes Neurais para o Ajuste Operacional do Período Final do Sopro de um processo de Aciaria a Oxigênio*. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, 2003. Dissertação de Mestrado.
- PAVAN, A. M. *Detecção on-line de vazamentos em vasos de pressão utilizando sistemas sônicos*. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2005. Dissertação de Mestrado.
- 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.
- PETROBRAS. *Exploração e Produção de Petróleo e Gás*. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/perfil/atividades/exploracao-producao-petroleo-gas/>>. Acesso em: 14 de novembro de 2008.
- PETROBRAS. *Nossa História*. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/nossa-historia/#decade2000>>. Acesso em: 10 de junho de 2011.
- QU, Z., FENG, H., ZENG, Z. ZHUGE, J. SHIJIU, S. A SVM-based pipeline leakage detection and pre-warning system. *Measurement*, v. 43, p. 513-519, 2010.
- 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.

- SANT'ANNA, Adailo. História dos dutos no Brasil. Centro de Tecnologia em Dutos. Disponível em <<http://www.ctdut.org.br/historiadedutos/historiadedutos.htm>> Acesso em: 15 de janeiro de 2008.
- SANTOS, R. B. *Desenvolvimento de Modelos Neurais Para Detectar e Localizar Vazamentos em Tubulações Transportando Gás*. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2011. Dissertação de Mestrado.
- SHIMANSKIY, S., IJIMA, 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*. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, 1996. Dissertação de Mestrado.
- SOUSA, E. O. *Detecção de Vazamento em Tubulação através de método Acústico e da análise de Transiente de Pressão*. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2007. Dissertação de Mestrado.
- SOUZA, A. L. *Detecção de vazamentos em tubulações através da Análise Espectral*. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, 2002, Tese de Doutorado.
- STREETER, V. L., WYLIE, G. B. Fluid Mechanics, *Mc Graw-Hill*, 1975. Cap. 5 p. 291-297, Cap. 12 p. 647-667.
- STREICHER, S. J. Acoustic monitoring systems - System concept and field experience. *Nuclear Engineering and Design*, v.129, p. 151-162, 1991.
- VERDE, C. Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines. *Control Engineering Practice*, v. 9, p. 673-682, 2001.
- VALPEIRO. Novas Ferramentas. Disponível em: <<http://www.editora.valete.com.br/sitepetroquimica/edicoes/ed295/295m2.html>>. Acesso em: 15 de julho de 2011.
- VERDE, C. VISAIRO, N. GENTIL, S. Two leaks isolation in a pipeline by transient response. *Advances in Water Resources*. 2007.

6 – Referências Bibliográficas

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.

YANG, J., WEN, Y., LI, P. Leak acoustic detection in water distribution pipelines. WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL AND AUTOMATION, 2008, Chongqing, China, p. 25-27.

ZHONG, T., ALOUNI, A.T., SMOAK, R.A. ANN Tube Leak Detection System. Proc. 29th Ieee Southeastern Symposium On Systems Theory, Cookeville TN, 1997.

APÊNDICE A – 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
```

Apêndice A

```
/* ----- */
/*                               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 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 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 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();
settextjustify(1,0);
settextstyle(0,0,1);
outtextxy(350,10," Para finalizar, aperte uma tecla");
}
}

```

Apêndice A

```
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 contiuo 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*/
}

```

Apêndice A

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

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

  setttextjustify(1,0);
  setttextstyle(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);
    ticx = 1.0*i+550*(count-1);
    gcvt(ticx,3,&buf);
    outtextxy(ix+2,465,&buf);
  }
  ticy = 6.0;
  for(i=0;i<=220;i=i+40)
  {
    iy = i+20;
    line(35,iy,40,iy);
    ticy = ticy - 1.0;
    gcvt(ticy,3,&buf);
    outtextxy(20,iy+4,&buf);
  }
  ticy = 11.0;
  for(i=240;i<=450;i=i+20)
  {
    iy = i+10;
    line(35,iy,40,iy);
    ticy = ticy - 1.0;
    gcvt(ticy,3,&buf);
    outtextxy(20,iy+4,&buf);
  }
  setttextjustify(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          */
/* ----- */

```

Apêndice A

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

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

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

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

wait_eoc( )
{
  unsigned register int ciclos,status;
  for (ciclos = TIME_OUT;ciclos;ciclos --)
  {
    status = inportb (base + ADSTS );
  }
}
```

```

if (!(status & EOC))
    return (TRUE);
}
return(FALSE);
}

/* ----- */
/*          ROTINA DE LEITURA DO CONVERSOR          */
/*          Parâmetro de entrada: numero do canal          */
/*          Parâmetro de saída: retorna o valor da 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);
}

```

Apêndice A

```
/* ----- */
/*          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) /* modo 1 a 5V? */
    trigger = 0xa00; /* sim, armazene a00h como valor de comparacao */
  else
    trigger = 0xb33;
  inatual = read_anl(7,140); /* le a entrada de refer centrando o offset */
  if(inatual < (trigger - 0x100)) /* existe a referencia de (3500mV)? */
    return(0x100); /* nao, retorne uma condicao de erro */
  for(i=0;flag ==0;++i) /* inicio do integ. p/ busca do ponto otimo */
  {
    inatual = read_anl(7,(i&0xff)); /* tente com i valor de offset */
    for(delay=0;delay<50;++delay) /* rotina para atraso */
      if(inatual == trigger) /* erro de leitura =zero? */
        flag = 1; /* termine a execucao pto encontrado */
    if(i == 0x400) /* feita o scan 4 vezes sem sucesso? */
      return(0x200); /* termine e retorne condicao de erro */
  }
  return(i-1); /* termine e retorne o valor ajustado */
}
```

```
/* ----- */
/*          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; /* default operacao bipolar */
  switch(n) /* scan do modo de operacao alternativo */
  {
    case 1:
```

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

Apêndice A

APÊNDICE B – PROGRAMA DE TREINAMENTO DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS NO SOFTWARE MATLAB 7.0.

```
n=load('dados.dat'); %leitura dos dados

% divisao dos dados para treinamento e para teste das redes neurais

p=n(:,1:13); %variavel de entrada, conjunto treinamento
t=n(:,14:15); %variavel de saida, conjunto treinamento
p=p';
t=t';

[pn,minp,maxp,tn,mint,maxt]=premnmx(p,t);
ptreina=pn(:,1:3000);
ttreina=tn(:,1:3000);
pteste=pn(:,3001:3600);
tteste=tn(:,3001:3600);

net=newff(minmax(ptreina),[13,1],{'tansig','purelin'},'trainbr'); %cria a rede neural

net.trainParam.epochs = 1000; %define o numero maximo de iteracoes (epocas)

net.trainParam.goal=1e-2; % define o objetivo de erro (SSE) do treinamento

net = init(net); %chuta valores iniciais para os pesos e bias

[net,tr]=train(net,ptreina,ttreina); %treina a rede com o conjunto de treinamento (p e t)

y=sim(net,pteste); %usa a rede neural para estimar (simular) a var. de saida (tcalc) a partir
das entradas do conjunto de teste (pp)

erro=tteste-y
figure(1);
plot(erro);

yd=postmnmx(y,mint,maxt);

figure(2);
postreg(tteste(1,:),y(1,:));

%figure(3);
%postreg(tteste(1,:),y(1,:));
```

Apêndice B

```
save 'rede1' net;  
net.IW{1}%pesos entre camadas entrada/intermediária  
net.LW{2}%pesos entre camadas intermediária  
net.LW{6}%pesos entre camadas intermediaria/saida  
net.b{1}%bias da camada intermediária  
net.b{2}%bias da camada intermediária  
net.b{3}%bias da camada de saída
```

APÊNDICE C – TRANSIENTES DE PRESSÃO E AMPLITUDE DO RUÍDO SONORO.

C.1 – Tubulação Rígida

A seguir 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. O transdutor de pressão e o microfone foram instalados no vaso de pressão.

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

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.

Apêndice C

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: Ar escoando na tubulação.

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

Variáveis: condições de operação

Pressão inicial: P_0 (kgf/cm²)

Amplitude: A (Volts)

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, 2,0, 3,0, 4,0 e 5,0 mm, e as pressões iniciais utilizadas foram de 2,0, 3,0, 4,0, 5,0 e 6,0 kgf/cm².

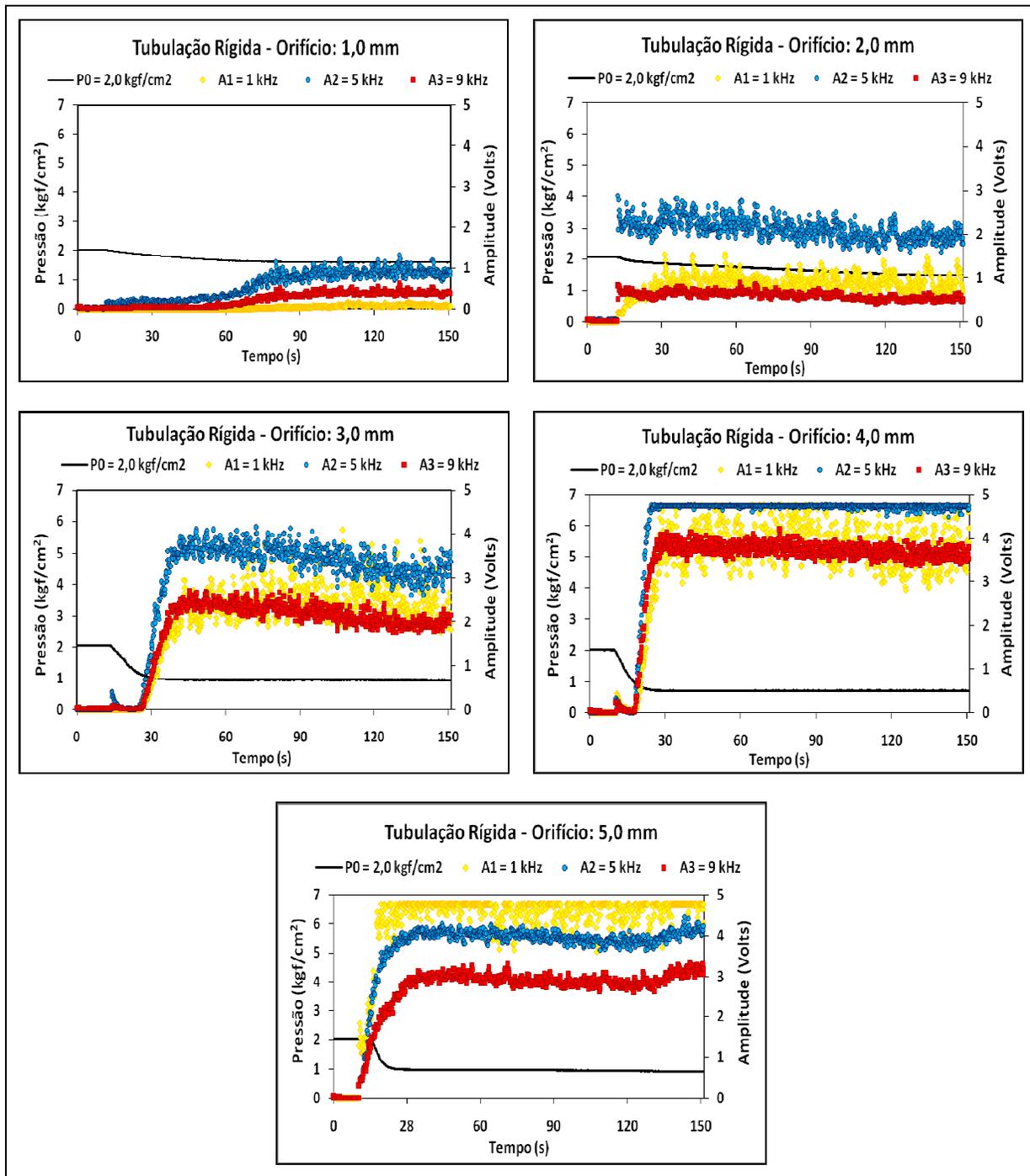


Figura C.1 – Transiente de pressão e amplitude do ruído sonoro. Pressão inicial de $2,0 \text{ kgf/cm}^2$.

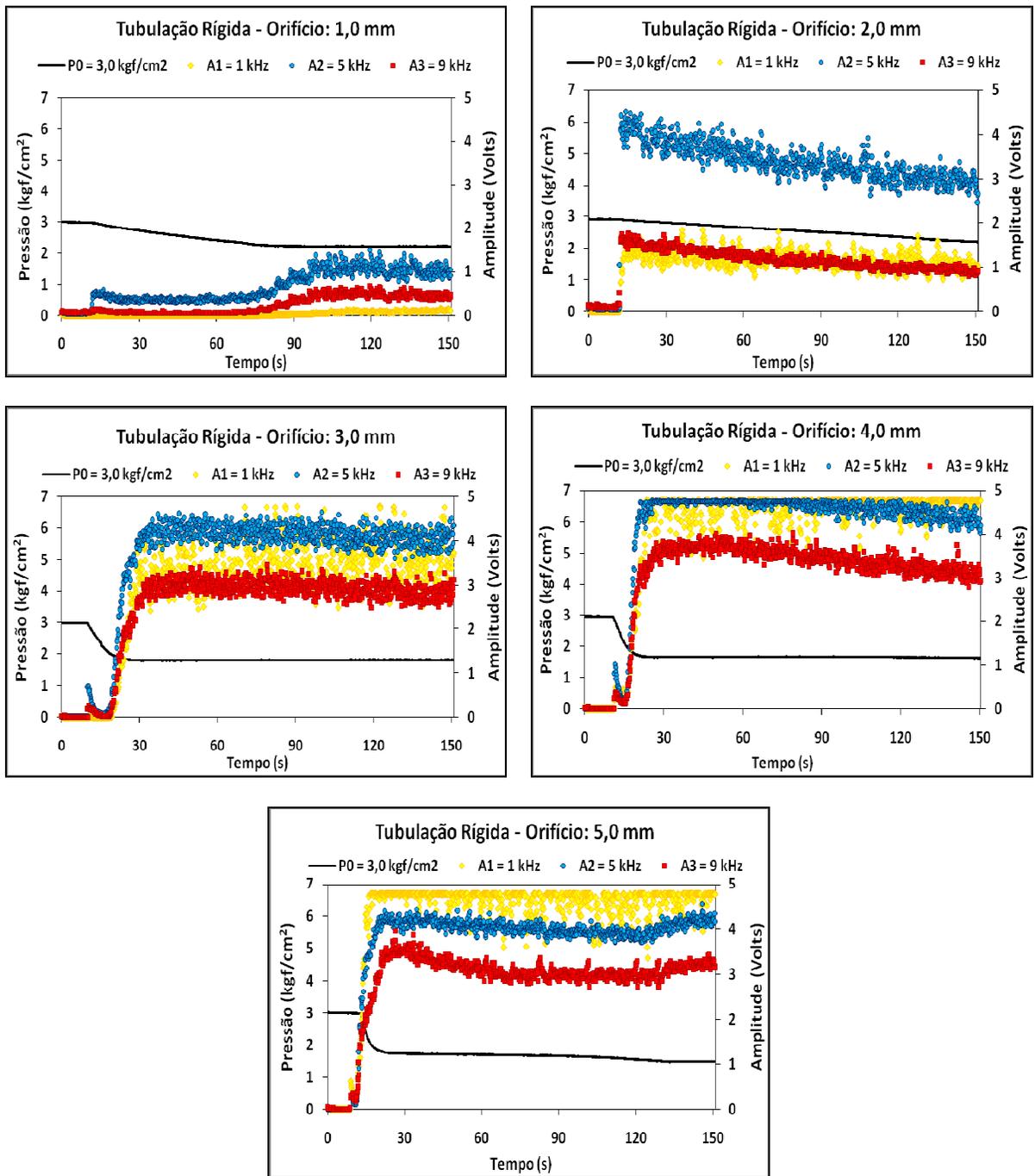


Figura C.2 – Transiente de pressão e amplitude do ruído sonoro. Pressão inicial de $3,0 \text{ kgf/cm}^2$.

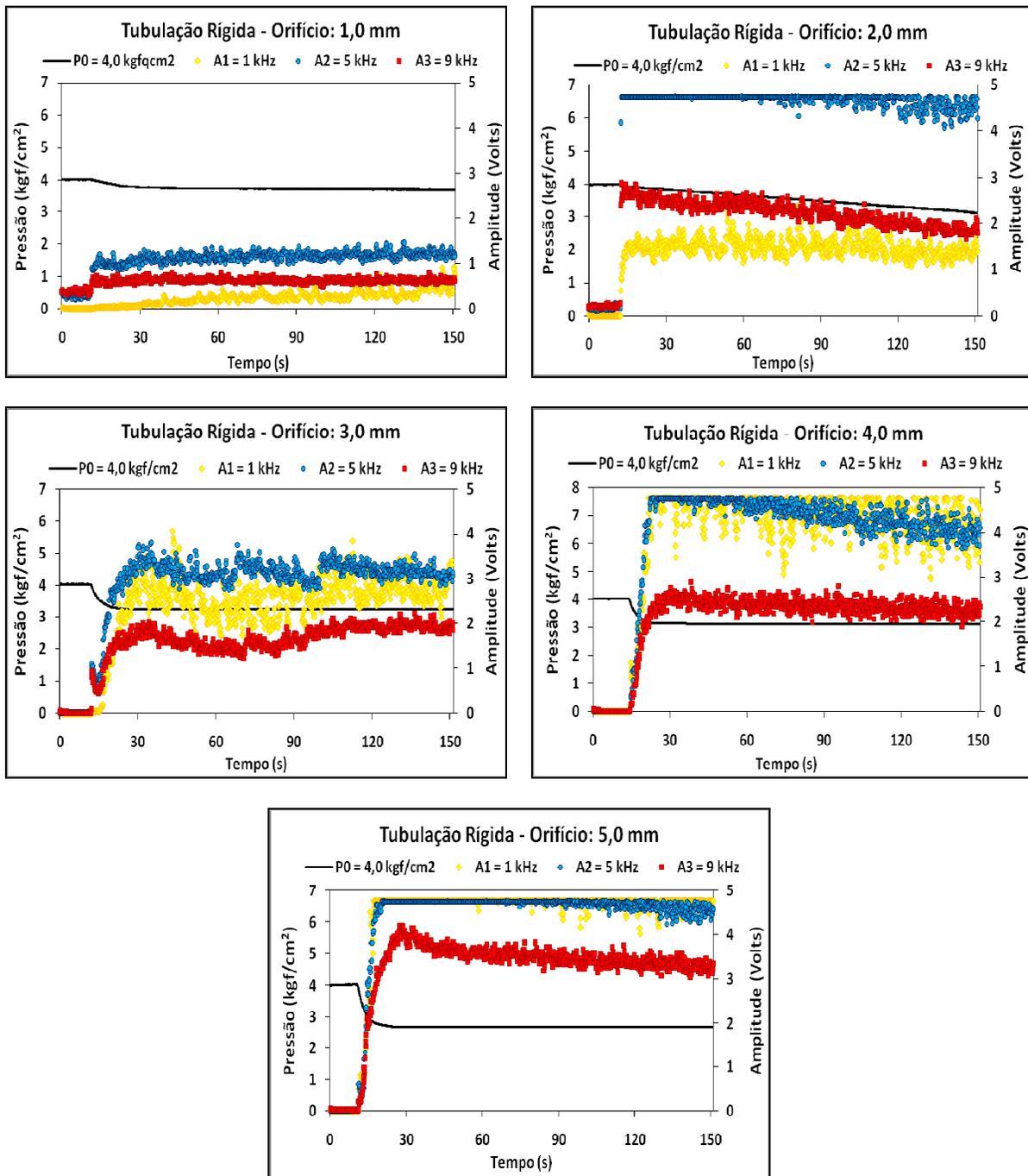


Figura C.3 – Transiente de pressão e amplitude do ruído sonoro. Pressão inicial de 4,0 kgf/cm².

Apêndice C

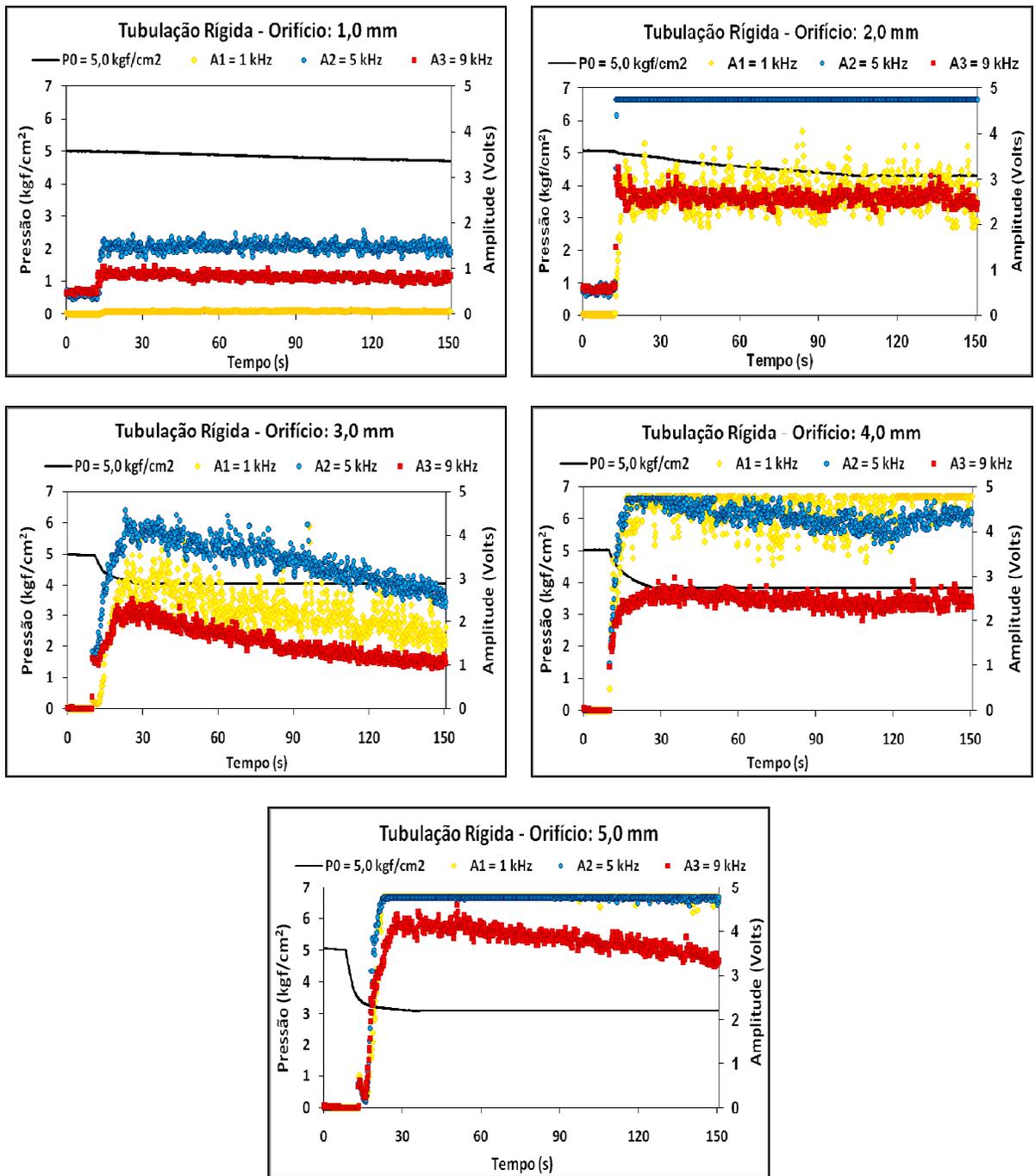


Figura C.4 – Transiente de pressão e amplitude do ruído sonoro. Pressão inicial de 5,0 kgf/cm².

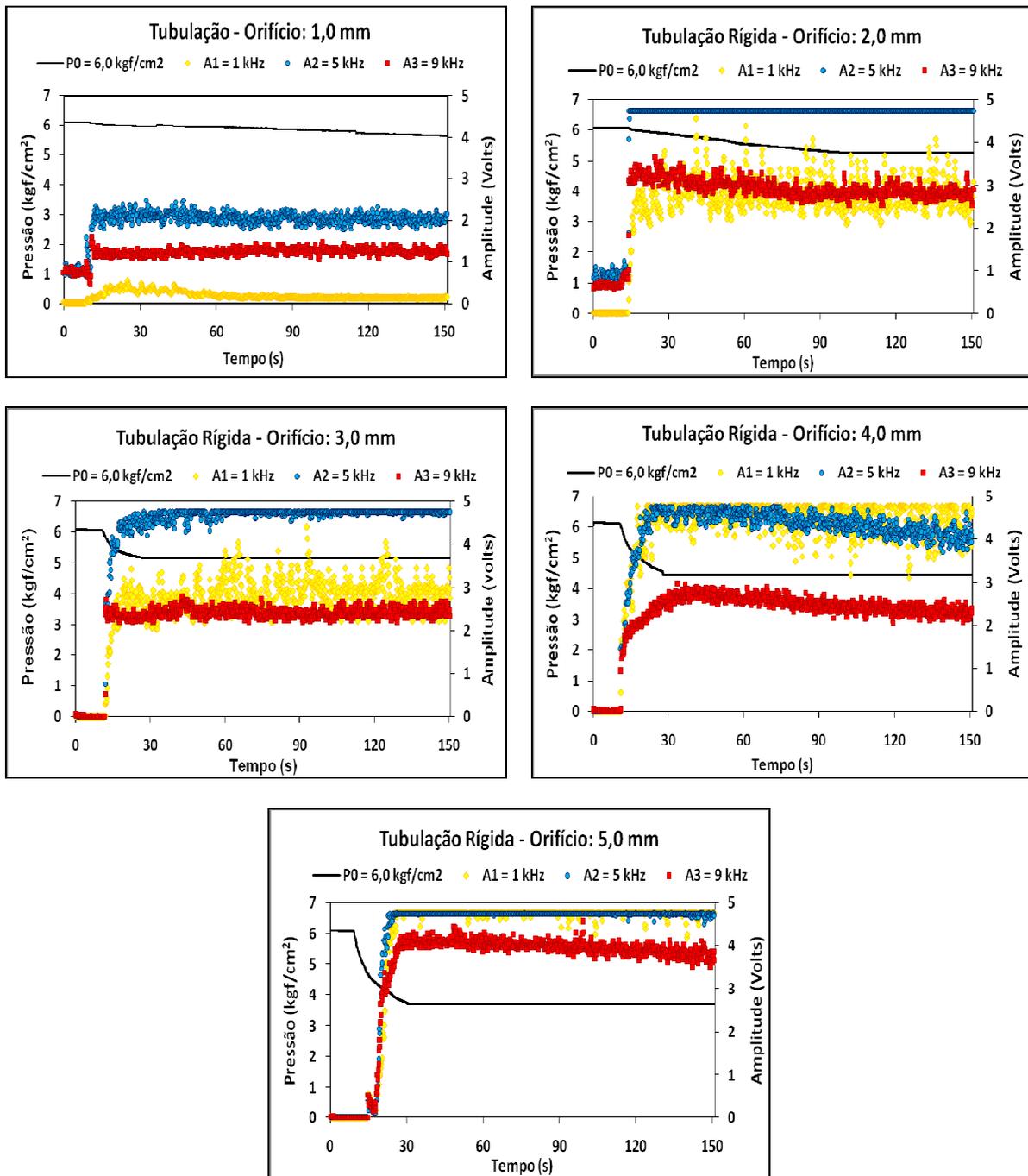


Figura C.5 – Transiente de pressão e amplitude do ruído sonoro. Pressão inicial de 6,0 kgf/cm².

APÊNDICE D – CÁLCULO DA MÉDIA MÓVEL E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS PARA TREINAMENTO

O primeiro passo para o treinamento das Redes Neurais Artificiais foi a realização do cálculo da média móvel no tempo em 40 instantes passados, conforme Figura D.1, desenvolvido em planilha eletrônica, tanto para a tubulação rígida, como a tubulação flexível. Para a determinação deste número de amostragens anteriores, foram realizados cálculos com 5, 10, 20 e 40 instantes anteriores e verificou-se que usando 40 pontos houve uma grande redução do ruído ainda existente nos sinais do microfone, facilitando o treinamento da rede neural.

Cálculo da Média Móvel para facilitar o treinamento da da Rede Neural														
Filtro 1kHz	Filtro 5kHz	Filtro 9kHz	k			k-1			k-2			k-3		
			S (1kHz)	S (5kHz)	S (9kHz)	S (1kHz)	S (5kHz)	S (9kHz)	S (1kHz)	S (5kHz)	S (9kHz)	S (1kHz)	S (5kHz)	S (9kHz)
0,0959	0,13497	0,1101	0,09401	0,25806	0,1079	0,09401	0,25806	0,1079	0,09401	0,25806	0,1079	0,09401	0,25806	0,1079
0,08518	0,10388	0,1175	0,09468	0,26188	0,10791	0,09468	0,26188	0,10791	0,09468	0,26188	0,10791	0,09468	0,26188	0,10791
0,07215	0,27705	0,1057	0,09554	0,2673	0,10774	0,09554	0,2673	0,10774	0,09554	0,2673	0,10774	0,09554	0,2673	0,10774
0,06426	0,25723	0,1014	0,09644	0,26916	0,10818	0,09644	0,26916	0,10818	0,09644	0,26916	0,10818	0,09644	0,26916	0,10818
0,06778	0,25595	0,1043	0,09731	0,26766	0,10909	0,09731	0,26766	0,10909	0,09731	0,26766	0,10909	0,09731	0,26766	0,10909
0,08026	0,26426	0,1056	0,09799	0,26627	0,11003	0,09799	0,26627	0,11003	0,09799	0,26627	0,11003	0,09799	0,26627	0,11003
0,0961	0,2527	0,1018	0,09819	0,26344	0,11079	0,09819	0,26344	0,11079	0,09819	0,26344	0,11079	0,09819	0,26344	0,11079
0,08991	0,25313	0,1025	0,09762	0,26004	0,11137	0,09762	0,26004	0,11137	0,09762	0,26004	0,11137	0,09762	0,26004	0,11137
0,09565	0,23655	0,0957	0,09728	0,26108	0,11188	0,09728	0,26108	0,11188	0,09728	0,26108	0,11188	0,09728	0,26108	0,11188
0,08125	0,21045	0,0937	0,09731	0,26242	0,11258	0,09731	0,26242	0,11258	0,09731	0,26242	0,11258	0,09731	0,26242	0,11258
0,09505	0,23281	0,0931	0,0974	0,26468	0,11344	0,0974	0,26468	0,11344	0,0974	0,26468	0,11344	0,0974	0,26468	0,11344
0,13043	0,25238	0,0969	0,0972	0,26602	0,11424	0,0972	0,26602	0,11424	0,0972	0,26602	0,11424	0,0972	0,26602	0,11424
0,16212	0,25135	0,1002	0,09628	0,26647	0,11488	0,09628	0,26647	0,11488	0,09628	0,26647	0,11488	0,09628	0,26647	0,11488
0,14791	0,25393	0,1004	0,09461	0,26783	0,11558	0,09461	0,26783	0,11558	0,09461	0,26783	0,11558	0,09461	0,26783	0,11558
0,13555	0,2833	0,1061	0,09333	0,26983	0,1165	0,09333	0,26983	0,1165	0,09333	0,26983	0,1165	0,09333	0,26983	0,1165
0,11991	0,26666	0,1038	0,09213	0,27037	0,11708	0,09213	0,27037	0,11708	0,09213	0,27037	0,11708	0,09213	0,27037	0,11708
0,10995	0,28613	0,1019	0,09216	0,27135	0,11774	0,09216	0,27135	0,11774	0,09216	0,27135	0,11774	0,09216	0,27135	0,11774
0,10352	0,20267	0,1067	0,09403	0,27135	0,11817	0,09403	0,27135	0,11817	0,09403	0,27135	0,11817	0,09403	0,27135	0,11817
0,09371	0,29568	0,1157	0,09564	0,27387	0,1184	0,09564	0,27387	0,1184	0,09564	0,27387	0,1184	0,09564	0,27387	0,1184
0,07952	0,28843	0,1195	0,09726	0,27542	0,1188	0,09726	0,27542	0,1188	0,09726	0,27542	0,1188	0,09726	0,27542	0,1188
0,06735	0,27286	0,107	0,0993	0,2765	0,11901	0,0993	0,2765	0,11901	0,0993	0,2765	0,11901	0,0993	0,2765	0,11901
0,0611	0,27341	0,1016	0,10132	0,27736	0,11943	0,10132	0,27736	0,11943	0,10132	0,27736	0,11943	0,10132	0,27736	0,11943
0,09022	0,25065	0,1043	0,10322	0,27761	0,11978	0,10322	0,27761	0,11978	0,10322	0,27761	0,11978	0,10322	0,27761	0,11978
0,09109	0,23299	0,0976	0,1041	0,27801	0,11988	0,1041	0,27801	0,11988	0,1041	0,27801	0,11988	0,1041	0,27801	0,11988
0,08298	0,21895	0,0959	0,10456	0,27903	0,12014	0,10456	0,27903	0,12014	0,10456	0,27903	0,12014	0,10456	0,27903	0,12014
0,06872	0,28216	0,0976	0,10502	0,28029	0,12043	0,10502	0,28029	0,12043	0,10502	0,28029	0,12043	0,10502	0,28029	0,12043
0,08074	0,29032	0,1322	0,10572	0,27962	0,12053	0,10572	0,27962	0,12053	0,10572	0,27962	0,12053	0,10572	0,27962	0,12053
0,10889	0,27771	0,1277	0,10597	0,27891	0,11985	0,10597	0,27891	0,11985	0,10597	0,27891	0,11985	0,10597	0,27891	0,11985
0,11636	0,27122	0,1179	0,10565	0,28034	0,11991	0,10565	0,28034	0,11991	0,10565	0,28034	0,11991	0,10565	0,28034	0,11991
0,11159	0,28048	0,1193	0,10487	0,28116	0,1199	0,10487	0,28116	0,1199	0,10487	0,28116	0,1199	0,10487	0,28116	0,1199
0,10833	0,28731	0,1255	0,10388	0,28107	0,11956	0,10388	0,28107	0,11956	0,10388	0,28107	0,11956	0,10388	0,28107	0,11956
0,0992	0,26935	0,1142	0,10278	0,28032	0,11895	0,10278	0,28032	0,11895	0,10278	0,28032	0,11895	0,10278	0,28032	0,11895
0,09423	0,28741	0,1234	0,10199	0,27998	0,11871	0,10199	0,27998	0,11871	0,10199	0,27998	0,11871	0,10199	0,27998	0,11871
0,08834	0,27923	0,1187	0,10164	0,2794	0,11826	0,10164	0,2794	0,11826	0,10164	0,2794	0,11826	0,10164	0,2794	0,11826
0,0725	0,27203	0,1127	0,10184	0,28124	0,11784	0,10184	0,28124	0,11784	0,10184	0,28124	0,11784	0,10184	0,28124	0,11784
0,07076	0,30252	0,108	0,10429	0,2894	0,12003	0,10429	0,2894	0,12003	0,10429	0,2894	0,12003	0,10429	0,2894	0,12003
0,06734	0,30203	0,1052	0,1057	0,29609	0,1209	0,1057	0,29609	0,1209	0,1057	0,29609	0,1209	0,1057	0,29609	0,1209
0,07733	0,28169	0,106	0,10712	0,30354	0,12147	0,10712	0,30354	0,12147	0,10712	0,30354	0,12147	0,10712	0,30354	0,12147
0,08818	0,26592	0,1038	0,10814	0,31277	0,12415	0,10814	0,31277	0,12415	0,10814	0,31277	0,12415	0,10814	0,31277	0,12415
0,10889	0,26476	0,1152	0,11156	0,32211	0,12664	0,11156	0,32211	0,12664	0,11156	0,32211	0,12664	0,11156	0,32211	0,12664
0,1227	0,28774	0,1106	0,11429	0,33325	0,13113	0,11429	0,33325	0,13113	0,11429	0,33325	0,13113	0,11429	0,33325	0,13113
0,11957	0,32076	0,1106	0,11927	0,34816	0,13556	0,11927	0,34816	0,13556	0,11927	0,34816	0,13556	0,11927	0,34816	0,13556
0,10822	0,35135	0,1232	0,12431	0,36289	0,13986	0,12431	0,36289	0,13986	0,12431	0,36289	0,13986	0,12431	0,36289	0,13986
0,099	0,19709	0,138	0,12957	0,38005	0,14618	0,12957	0,38005	0,14618	0,12957	0,38005	0,14618	0,12957	0,38005	0,14618
0,09532	0,20042	0,1418	0,13485	0,40316	0,15257	0,13485	0,40316	0,15257	0,13485	0,40316	0,15257	0,13485	0,40316	0,15257
0,08801	0,15118	0,1361	0,14009	0,4266	0,15838	0,14009	0,4266	0,15838	0,14009	0,4266	0,15838	0,14009	0,4266	0,15838
0,07342	0,11657	0,1249	0,14558	0,4538	0,1668	0,14558	0,4538	0,1668	0,14558	0,4538	0,1668	0,14558	0,4538	0,1668

Figura D.1 – Cálculo da Média Móvel.

