

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**

Flávia Morini Garcia

**CARACTERIZAÇÃO VIBROACÚSTICA DE VAZAMENTOS A
PARTIR DE UMA SEÇÃO DE DUTO PARA APLICAÇÕES NA
INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS**

Florianópolis
2010

Flávia Morini Garcia

**CARACTERIZAÇÃO VIBROACÚSTICA DE VAZAMENTOS A
PARTIR DE UMA SEÇÃO DE DUTO PARA APLICAÇÕES NA
INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS**

**Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química da Universidade
Federal de Santa Catarina, como
requisito parcial para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia
Química.**

**Orientador: Prof. Dr. Marinho Bastos
Quadri
Co-Orientador: Prof. Dr. Ricardo F. A.
Machado**

Florianópolis
2010

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da
Universidade Federal de Santa Catarina

G731c Garcia, Flávia Morini
Caracterização vibroacústica de vazamentos a partir de
uma seção de duto para aplicações na indústria de petróleo
e gás [dissertação] / Flávia Morini Garcia ; orientador,
Marinho Bastos Quadri. - Florianópolis, SC, 2010.
133 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química.

Inclui referências

1. Engenharia química. 2. Detecção de vazamentos. 3.
Vibroacústica. 4. Processamento de sinais. 5. Redes neurais
artificiais. I. Quadri, Marinho Bastos. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química. III. Título.

CDU 66.0

“CARACTERIZAÇÃO VIBROACÚSTICA DE VAZAMENTOS A PARTIR DE UMA SEÇÃO DE DUTO PARA APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS”

Por

Flávia Morini Garcia

Dissertação de Mestrado julgada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Desenvolvimento de Processos Químicos e Biotecnológicos pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri
Orientador

Prof. Dr. Ricardo A. F. Machado
Co-orientador

Prof. Dr. Leonel Teixeira Pinto
Coordenador do CPGENQ

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri

Prof. Dr. Ricardo A. F. Machado

Prof. Dr. Ariovaldo Bolzan

Dr. Marcio Humberto Silva Siqueira

Prof. Dr. Roberto Jordan

*Dedico este trabalho com todo
o meu amor à minha querida
mãe, que me apoiou e esteve
sempre ao meu lado.*

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Jesus Cristo por me dar saúde e serenidade para continuar,
todos os dias da minha vida;

Ao Prof. Marinho pela amizade, pela ótima orientação ao longo do
trabalho, e pelo exemplo de profissionalismo e dedicação;

Ao Prof. Ricardo, por todo o apoio e oportunidade desde o começo e ao
Prof. Arioaldo por toda a disposição e ajuda;

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)
e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo apoio financeiro
prestado por intermédio do Programa de Recursos Humanos da ANP
para o setor do Petróleo, Gás e Biocombustíveis – PRH34 ANP/MCT;

À minha família, pelo apoio e amor de sempre;

Aos meus amigos, Agenor Furigo Neto, Mauricio Edgar Stivanello e
Eduardo Scussiato, pelas sugestões e ajuda que muito contribuíram para
a realização deste trabalho e em especial ao Francisco Rafael Moreira da
Mota, sempre disposto a ajudar, sempre amigo em todas as horas;

À Sinara O. Dal Farra, pela incansável ajuda nos experimentos, por
iluminar a minha vida, por todas as coisas importantes que me ensinou,
meus sinceros agradecimentos e amor;

Aos colegas do LCP, pelos momentos de descontração;

À Raquel R. Suzuki, minha amiga diamante, pessoa especial que surgiu
na minha vida, sempre questionadora, sempre disposta a estar ao meu
lado quando preciso e sempre acreditando nas possibilidades;

A todos os bons mestres e livros que tive e li durante a minha vida,
pelos ensinamentos.

*“A felicidade só é verdadeira
quando é compartilhada.”
(Christopher Johnson
McCandless)*

RESUMO

Neste trabalho aplicou-se um método experimental aqui denominado vibroacústico para detecção de vazamentos em redes de tubulações para aplicações na indústria de petróleo e gás. Para isso, foi construída uma bancada experimental de forma que a mesma pudesse reproduzir adequadamente um vazamento de petróleo ou gás, de acordo com a realidade industrial. Projetou-se uma seção de duto de aço com 2 m de comprimento, 0.1 m de diâmetro interno, com espessura da parede de 5,7 mm e 5 placas com furos de diâmetros: 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm e uma fenda de 0,5mm x 30mm, que eram parafusadas sobre uma janela na parede do duto para os ensaios de vazamento. Neste contexto, foram analisados sinais de vibração obtidos de um acelerômetro piezoelétrico sob diferentes condições operacionais de vazamento de ar comprimido, água e óleo de soja. Também foram analisadas vibrações produzidas em situações de não vazamento na seção de duto. Constatou-se que, para os ensaios de vazamento, picos característicos da despressurização foram encontrados no espectro de frequências obtido pela Transformada Discreta de Fourier (TDF) aplicada ao sinal gerado para os três fluidos utilizados. Tais picos não foram observados nos experimentos que consistiram em situações de não vazamento. Estes resultados indicaram que é possível distinguir, no espectro de frequências do sinal, um evento de vazamento de um evento de não vazamento. Outros estudos foram realizados com Redes Neurais Artificiais (RNA's) que foram treinadas com sinais de vazamento e não vazamento provenientes do acelerômetro piezoelétrico, mostrando resultados relevantes para a aplicação deste método na identificação de vazamentos em redes de dutos. A arquitetura das redes neurais treinadas e validadas é do tipo *feedforward* multicamadas (*multilayer feedforward networks*) que utiliza o algoritmo de aprendizado *backpropagation* (ajusta automaticamente os pesos) na etapa de treinamento. Para a RNA treinada com 40 dados na camada de entrada foi possível detectar 100% dos vazamentos e 97% dos eventos de não vazamento. Portanto, o método aqui introduzido se mostrou promissor para a detecção de vazamentos em dutos de petróleo e gás.

Palavras-Chave: Detecção de Vazamentos, Vibroacústica, Processamento de Sinais, Redes Neurais Artificiais.

ABSTRACT

In this work was applied an experimental method vibroacoustic for leak detection in networks of pipes for applications in the oil and gas industry. Thus, was constructed a scale experimental of a pipeline so that it adequately represents a leak of oil or gas, according to the industrial reality. It was designed a section of pipeline steel with 2 m long, 0.1 m inside diameter, with wall thickness of 5.7 mm and 5 plates with diameter holes: 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm and a gap of 0.5 mm x 30mm, they were screwed on a window in the wall of the pipe to leak tests. Thus were analyzed the vibration signals obtained from a piezoelectric accelerometer under various operating conditions of an air leakage, of a water and soybean oil. We also analyzed vibration of not leak in the section of pipeline. It was found that for tests of leak, characteristic peaks of the depressurization were found in the frequency spectrum obtained by Discrete Fourier Transform (DFT) applied to the signal generated for the three fluids used. These peaks were not observed in experiments that consisted in simulating of not leak. These results indicated that it is possible to distinguish in the frequencies spectrum of signal an event of a leak of an event not leak. Other studies were performed using Artificial Neural Networks (ANNs) who have been trained with signs of leak and not leak from a piezoelectric accelerometer showing results relevant to the application of this method in the operation of pipeline networks. The architecture of neural networks trained and validated is the type multilayer feedforward (multilayer feedforward networks) using the backpropagation learning algorithm (automatically adjusts the weights) in the training stage. To the trained ANN with 40 data in the input layer was possible to detect 100% of the leaks and 97% of events with no leak. Therefore, the method introduced has shown promising for detecting leaks in oil and gas pipelines.

Keywords: Leak Detection, Vibroacustisc, Signal Processing, Artificial Neural Networks

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais métodos de detecção de vazamentos em dutos.	5
Figura 2: Aparato montado em laboratório para padrão de referência. ...	9
Figura 3: (a) Exemplo de sinal analógico e (b) exemplo do mesmo sinal digitalizado.	12
Figura 4: Onda contínua e amostragem.	13
Figura 5: ((a), (b), (c) e (d)) Ilustrações de sinais analógicos e digitais de amostragem apropriadas e inapropriadas.	14
Figura 6: Modelo de neurônio artificial.	16
Figura 7: Gráficos de funções de transferência.	17
Figura 8: Camadas da rede neural.	17
Figura 9: Seção de duto utilizada no trabalho.	20
Figura 10: Detalhe dos chanfros para fixação da placa perfurada e do sensor de aceleração.	20
Figura 11: Placas planas com furos para os ensaios de vazamentos.	20
Figura 12: (a), (b) Fechadura eletromagnética utilizada no experimento e a mesma fechadura fixada na lateral da seção de duto, respectivamente.	21
Figura 13: (a), (b) Esquema do sistema de aquisição de dados e foto do mesmo sistema, respectivamente.	22
Figura 14: Acelerômetro piezoelétrico utilizado nos experimentos.	23
Figura 15: Faixa útil de frequência de um acelerômetro.	24
Figura 16: Resposta de amplitude característica para filtros passa-alta e passa-baixa do modelo Nexus 2693-A-0S2.	25
Figura 17: Montagem do teste de verificação.	27
Figura 18: (a) Espectro de frequência real de uma onda senoidal com frequência de 2,093 kHz e (b) espectro de frequência para o sinal da onda senoidal reproduzido pelo acelerômetro com frequência de 2,093 kHz.	27
Figura 19: (a) Espectro de frequência real de uma onda triangular com frequência de 2,093 kHz e (b) espectro de frequência reproduzido através do teste para o sinal da onda triangular.	28
Figura 20: (a) Sinal de uma onda senoidal com frequência de 15 kHz e (b) espectro de frequência para o sinal da onda senoidal.	28
Figura 21: Resposta dos sensores ao longo do tempo resultante de um golpe com instrumento metálico.	29
Figura 22: Esquema do posicionamento dos chanfros na lateral da seção de duto.	30
Figura 23: Esquema do posicionamento dos chanfros no lado oposto ao orifício de vazamento na seção de duto.	31

Figura 24: (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g) Sinal em Volts e respectivo espectro de Fourier com taxa de amostragem 150, 140, 130, 120, 110, 100 e 90 kHz, respectivamente.....	41
Figura 25: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências para os orifícios circulares (4 mm,3 mm, 2mm, 1mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $1,96133 \times 10^5$ Pa.....	43
Figura 26: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências para os orifícios circulares (4 mm,3 mm, 2mm, 1mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $5,9 \times 10^5$ Pa. ..	45
Figura 27: Espectro de frequências para o orifício circular de diâmetro 4 mm, pressurizando à $1,96 \times 10^5$ Pa.	46
Figura 28: Espectro de frequências para o orifício circular de diâmetro 4 mm, pressurizando à $5,9 \times 10^5$ Pa.	46
Figura 29: (a), (b), (c), (d), (e) Espectros de tempo/frequência em 3 dimensões para os orifícios circulares (4 mm,3 mm, 2mm, 1mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $5,9 \times 10^5$ Pa. ..	47
Figura 30: Vista superior do espectro de tempo/frequência do caso apresentado na Figura 27 (a).	48
Figura 31: Espectros de tempo - frequência em 3 dimensões para o orifício circular de 4 mm, à pressão de $5,9 \times 10^5$ Pa, durante 5 segundos.	49
Figura 32: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências para os orifícios circulares (4 mm,3 mm, 2mm, 1mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão inicial de $1,96 \times 10^5$ Pa, com parafina para a vedação.	50
Figura 33: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, para a fechadura eletromagnética, à $1,96 \times 10^5$ Pa.....	51
Figura 34: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, para a parafina, à $1,96 \times 10^5$ Pa.....	51
Figura 35: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências para os orifícios circulares (4 mm,3 mm, 2mm, 1mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $5,9 \times 10^5$ Pa, com parafina para a vedação.	52
Figura 36: (a) golpe na extremidade, (b) golpe no centro e (c) golpe na extremidade. Todos os golpes foram desferidos no lado onde se encontra o orifício de vazamento.	54
Figura 37: Espectro de frequências de um golpe deferido no centro da seção de duto, onde se encontra o orifício de vazamento.	55
Figura 38: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, pressurizando a seção de duto à $5,9 \times 10^5$ Pa.....	55

Figura 39: (a) golpe na extremidade 1, (b) golpe no centro e (c) golpe na extremidade. Todos os golpes foram desferidos no lado oposto ao orifício de vazamento.....	56
Figura 40: Sinal em Volts e respectivo espectro de frequência para o orifício circular (4 mm), com pressurização de $5,9 \times 10^5$ Pa, preenchendo-se parcialmente a seção de duto com 6 litros de água líquida.	57
Figura 41 : Sinal em Volts e respectivo espectro de frequência para o vazamento pela entrada de ar, com pressurização de $1,96 \times 10^5$ Pa.....	58
Figura 42: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências utilizando os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2mm, 1mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $9,8 \times 10^5$ Pa.....	59
Figura 43: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, com água, pressurizando a seção de duto à $9,8 \times 10^5$ Pa.	60
Figura 44: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, pressurizando a seção de duto à $5,9 \times 10^5$ Pa.....	60
Figura 45: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, com água, pressurizando a seção de duto à $9,8 \times 10^5$ Pa.	61
Figura 46: Espectro de frequências da seção de duto preenchida completamente com água e aplicação de movimentos pendulares na direção axial.....	61
Figura 47: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências para os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2mm, 1mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $9,8 \times 10^5$ Pa....	62
Figura 48: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, com óleo, pressurizando a seção de duto a $9,8 \times 10^5$ Pa.	63
Figura 49: Espectro de frequências em ausência de vazamento com o duto cheio de óleo, pressurizando a $9,8 \times 10^5$ Pa.	63
Figura 50: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, com óleo, pressurizando a seção de duto à $9,8 \times 10^5$ Pa.	64
Figura 51: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, com água, pressurizando a seção de duto à $9,8 \times 10^5$ Pa.	64
Figura 52: (a), (b), (c) Sinal em Volts e respectivo espectro de frequências de Fourier com taxa de amostragem 150, 130, 110 e 90 kHz, respectivamente.....	65

Figura 53: (a), (b) Sinais (em Volts) em função da amostragem e respectivo espectrograma de frequências para golpes seguidos na lateral externa e um golpe no interior da seção de duto, respectivamente.....	66
Figura 54: (a), (b) Sinais (em Volts) em função da amostragem e respectivo espectrograma de frequências para a pressurização da seção de duto e o ruído no ambiente onde a seção de duto se encontrava, respectivamente.	67
Figura 55: (a), (b) e (c) Sinais (em Volts) em função da amostragem e respectivo espectrograma de frequências para a aplicação de movimentos pendulares na direção axial sobre a seção de duto vazia, preenchida até a metade e preenchida completamente com água, respectivamente.	68
Figura 56: (a), (b) Sinais (em Volts) em função da amostragem e respectivo espectrograma de frequências na presença de uma bomba e um agitador em contato com a seção de duto, respectivamente.	69
Figura 57: Arquitetura da RNA com 40 dados de entrada.	70
Figura 58: Erro médio quadrático em função do número de iterações..	71
Figura 59: Arquitetura da RNA com 30 dados de entrada.	72
Figura 60: Erro médio quadrático em função do número de iterações..	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Acidentes mais significativos, relativamente ao volume vazado, em dutos da Petrobras nesta década.	2
Tabela 2: Série Histórica de Vazamentos (*) em m ³	3
Tabela 3: Distâncias estimadas pelos métodos entre o vazamento e o sensor.....	10
Tabela 4: Ensaios de vazamentos utilizando a fechadura eletromagnética ou parafina para vedar os orifícios de vazamento.	31
Tabela 5: Descrição das situações de não vazamento consideradas.....	34
Tabela 6: Resultado obtido para a rede neural treinada.....	71
Tabela 7: Resultado obtido para a rede neural treinada.....	73
Tabela 8: Comparação do percentual de insucesso de previsão das redes neurais treinadas e validadas.	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
ADA	Analógico-Digital-Analógico
D/A	Digital/Analógico
ND	Número Decimal
RNA	Rede Neural Artificial
RNA`s	Redes Neurais Artificiais
TA	Tensão de Entrada
TDF	Transformada Discreta de Fourier
Transpetro	Petrobras Transporte S/A

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
cm	Centímetro
ft	Pé
gal	Galão
h	Hora
kgf	Quilograma-força
kHz	Quilohertz
km	Quilômetro
m	Metro
$m.s^{-2}$	Metro por segundo ao quadrado
m^3	Metro cúbico
MHz	Megahertz
mm	Milímetro
mV	Milivolt
s	Segundo
V	Volt

4.6 Desempenhos das Redes Neurais Artificiais	70
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	75
5.1 Conclusões	75
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	76
APÊNDICE A – Sinais e espectros de frequências para o chanfro 1....	81
APÊNDICE B – Sinais e espectros de frequência para o chanfro 3	85
APÊNDICE C – Sinais e espectros de frequência para o chanfro 4	89
APÊNDICE D – Sinais e espectros de frequências para o chanfro 5....	93
ANEXO A – Arquitetura da RNA com 40 dados de entrada igualmente espaçados no espectro de frequências	97
ANEXO B – Parâmetros de treinamento da RNA com 40 dados de entrada igualmente espaçados no espectro de frequências.....	99
ANEXO C – Arquitetura da RNA com os 40 dados de entrada com maior valor de magnitude no espectro de frequências	101
ANEXO D – Parâmetros de treinamento da RNA com os 40 dados de entrada com maior valor de magnitude no espectro de frequências....	103

1 INTRODUÇÃO

No presente trabalho estão contemplados os resultados dos estudos desenvolvidos visando à caracterização vibroacústica de vazamentos a partir de uma seção de duto para aplicações na indústria de petróleo e gás.

De forma objetiva, o trabalho iniciou-se por um estudo bibliográfico da temática de vazamentos e no subsequente desenvolvimento e aplicação de uma metodologia experimental para o estudo do sinal vibroacústico gerado por um jato de fluido a partir de um orifício subitamente aberto na parede de um segmento de duto.

1.1 Justificativa

Milhares de redes de dutos têm sido construídas em todo o mundo com a finalidade de transportar variados produtos de refinarias, campos de petróleo e bases de distribuição. Segundo Macias (2004), a cada ano são transportados por tubulações, em terra e mar, diversos produtos com valor estimado em milhões de dólares. Desta forma, as tubulações são consideradas o melhor meio para se transportarem fluidos a longas distâncias, uma vez que apresentam menor custo de transporte quando comparado com o rodoviário, ferroviário e marítimo; são mais seguras que qualquer outro meio de transporte, apresentando a menor taxa de acidentes e de danos causados ao meio ambiente; além de serem muito eficientes em termos de energia (KENNEDY, 1993).

Segundo o Relatório Anual divulgado pela Petrobras Transporte S/A (Transpetro) em 2008, a malha brasileira de 7033 km de oleodutos movimentou 245 milhões de m³/ano e os 20 terminais terrestres movimentaram 101,5 milhões de m³/ano com um giro médio dos estoques de 2,45 vezes por ano. Os 26 terminais aquaviários movimentaram 324 milhões de m³/ano, com giro de estoque de 2,09 vezes por mês. Os oleodutos e os 46 terminais terrestres e aquaviários da Transpetro movimentaram 670 milhões de m³/ano de petróleo, derivados e álcool. Em 2006 a Transpetro operava 3000 km de gasodutos, mas em 2008 já eram 4500 km - um incremento de 50%. Foram movimentados, em média, 46 milhões de m³/dia. Segundo previsão da Transpetro, em 2009 e 2010 a malha de gasoduto será ampliada em cerca de 2000 km.

Neste contexto, o número e a extensão de gasodutos e oleodutos, instalados atualmente, impulsionaram a busca pelo desenvolvimento de técnicas altamente confiáveis para inspecionar e detectar possíveis

vazamentos ao longo destes dutos, objetivando minimizar os prejuízos. Desta forma, o conhecimento prévio das características dos sinais associados ao vazamento é um fator crucial para a correta identificação da situação de vazamento em operações de campo na indústria do petróleo.

Através do exposto, verifica-se que a preocupação com possíveis vazamentos em redes de tubulações é um assunto que esteve sempre em pauta neste processo de expansão da empregabilidade dos mesmos. De acordo com Souza (2007), os vazamentos podem ocorrer devido a variações bruscas na pressão, ação corrosiva ou manutenção inadequada. Um pequeno percentual de perda pode gerar significantes impactos econômicos, danos ambientais e prejuízos para a segurança pessoal.

Além disso, deve-se mencionar que a crescente preocupação com a proteção do meio ambiente e com a segurança da população são fatores que incentivam a implementação de uma tecnologia de detecção de vazamento segura e confiável.

Nas Tabelas 1 e 2, abaixo, têm-se os dados dos acidentes mais significativos em termos de volume vazado nesta década e a série histórica dos volumes vazados, ocorridos com dutos da Petrobras.

Tabela 1: Acidentes mais significativos, relativamente ao volume vazado, em dutos da Petrobras nesta década.

Data	Duto
2000	Acidente provocado por uma falha no duto PE II da Refinaria Duque de Caxias, da Petrobras, na baía de Guanabara (RJ). Vazamento de 1,3 mil toneladas de óleo.
2000	Cerca de 4 milhões de litros de óleo cru vazam do oleoduto OSPAR na Refinaria Presidente Getúlio Vargas, em Araucária (PR), causando o maior acidente ambiental envolvendo a Petrobras nos últimos 26 anos.
2001	Oleoduto OLAPA de 93 km se rompe e vazam cerca de 50 mil litros de óleo diesel na serra do Mar, no Paraná, atingindo quatro rios.
2003	Vazamento de 25 mil litros de petróleo a partir de um navio em São Sebastião no Estado de São Paulo.

Fonte: Petrobras (2000, 2001, 2003).

Tabela 2: Série Histórica de Vazamentos ^(*) em m³.

Ano	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Volume (m ³)	276	530	256	293	386	436

(*) São contabilizados vazamentos de petróleo e derivados acima de um barril (0,159 m³) que atingem o meio ambiente.

Fonte: Petrobrás (2008).

Almeja-se, portanto, contribuir para suprir as demandas de segurança e de preservação do meio ambiente, além de colaborar para a independência tecnológica do país nas operações de transporte de combustíveis por meio de dutos.

Neste trabalho, realizou-se um estudo da caracterização do sinal vibroacústico gerado por um jato de fluido a partir de furos de diferentes tamanhos subitamente abertos na parede de um segmento de duto. Tal análise constitui em elemento imprescindível no desenvolvimento futuro de técnicas para a identificação e detecção de vazamentos na indústria de petróleo e gás.

1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é a caracterização vibroacústica de vazamentos a partir de uma seção de duto para aplicações na indústria de petróleo e gás.

De forma específica seu desenvolvimento envolveu:

- elaboração de um quadro teórico/experimental da situação de vazamentos em dutos e a importância de pesquisas na área para a indústria de petróleo e gás;
- desenvolvimento de uma metodologia experimental para o estudo do sinal vibroacústico gerado por um jato de fluido a partir de um furo subitamente aberto na parede de um segmento de duto;
- utilização de técnicas de tratamento de sinais tais como: Transformada Discreta de Fourier (TDF) e Redes Neurais Artificiais (RNA`s).

1.2 Estrutura do trabalho

Para o atendimento dos objetivos propostos, o presente trabalho foi estruturado sob a forma de seis capítulos, incluindo este introdutório.

Segue-se o Capítulo 2 onde se apresenta uma revisão bibliográfica sobre as principais técnicas para detecção de vazamentos em dutos utilizadas atualmente; sobre as técnicas de processamento de sinais que foram utilizadas no tratamento dos resultados experimentais; e sobre RNA's.

O Capítulo 3 é dedicado à descrição dos materiais utilizados; ao detalhamento da estrutura experimental; à metodologia aplicada aos experimentos, e a descrição do desenvolvimento das RNA's utilizadas.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos através do processamento dos sinais obtidos dos vazamentos, dos eventos de não vazamento e do treinamento e validação das RNA's aplicadas.

O Capítulo 5 contém as conclusões finais resultantes dos estudos desenvolvidos e sugestões para trabalhos futuros.

No Capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas e documentais que serviram de fundamentação teórica para a realização do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma descrição dos principais métodos utilizados para detectar vazamentos em dutos de petróleo e gás; alguns princípios e ferramentas utilizados em processamento de sinais; e conceitos fundamentais de RNA's. Toda a revisão bibliográfica tem por foco conceitos que possam oferecer fundamentos para o entendimento da metodologia utilizada e para os resultados obtidos no trabalho.

2.1 Principais técnicas para a detecção de vazamentos

De acordo com Souza (2007), os vazamentos em redes de tubulações ocorrem devido a fatores como: escavações desavisadas no entorno de redes de tubulações, variações bruscas na pressão, ação corrosiva ou manutenção inadequada que, conseqüentemente, podem gerar sérios problemas de poluição ao meio ambiente, grandes prejuízos financeiros para a indústria e a interrupção no fornecimento do produto até que a tubulação seja reparada.

Ainda Souza (2007), citou as seguintes técnicas de detecção de vazamentos em dutos como as mais relevantes: método estatístico, redes neurais artificiais, ondas de pressão negativa, balanço de volume, gradientes de pressão, variações inesperadas, a observação, a modelagem matemática, métodos baseados em sensores, entre outros.

Sob outro enfoque, Zhang (1996) classificou os métodos de detecção em três categorias: observação, métodos de detecção diretos, métodos de detecção indiretos. A Figura 2 apresenta um detalhamento da classificação feita pelo autor.

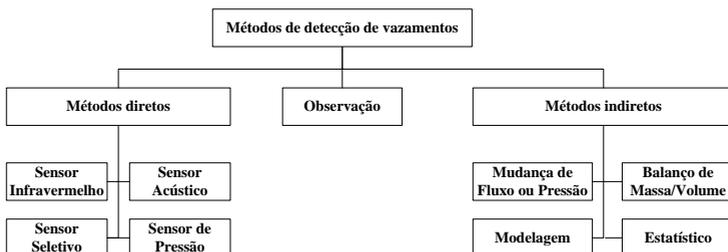


Figura 1: Principais métodos de detecção de vazamentos em dutos.

Fonte: Baseado em classificação de Zhang (1996).

Outra classificação, apresentada por Sandberg *et al.* (1989), divide os sistemas de detecção de vazamentos em duas categorias: estático e dinâmico. Sistemas dinâmicos são utilizados enquanto a tubulação está operando, enquanto os métodos estáticos de detecção são úteis depois que o vazamento tenha sido detectado para encontrar sua localização.

Neste contexto de várias classificações, é consensual que o método mais simples e antigo de detectar vazamentos é através da inspeção visual periódica de sua integridade. Um método bastante em uso consiste na injeção de aditivos químicos e gases atóxicos provendo odor. Entretanto, a eficácia desse método depende das condições ambientais e da direção do vento (BLACK, 1992).

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

O método de gradientes de pressão opera com o princípio de que um vazamento deve distorcer o perfil de pressão ao longo de uma seção da tubulação. Instalando-se transdutores de pressão nas extremidades das seções, o gradiente médio ao longo da linha pode ser calculado e qualquer variação desse gradiente indica a ocorrência de vazamento. É possível localizar o vazamento através da interpolação entre as medidas de pressão (BLACK, 1992).

No método de balanço de massa e volume, o vaso de pressão ou a tubulação são equipados com medidores de fluxo na entrada e na saída, sendo que as taxas de fluxo são comparadas continuamente em tempo real. Qualquer diferença entre a taxa de fluxo nas duas extremidades significa um vazamento. O método pode gerar falsos alarmes pelo fato de que a taxa de fluxo depende de vários parâmetros do fluido (temperatura, pressão, densidade e viscosidade) (BLACK, 1992). Sandberg *et al.* (1989) analisaram um método baseado nesse princípio. Esse sistema de segurança dispara um alarme quando a diferença de volume entre a entrada e saída da tubulação é superior a 2% para líquidos e 10% para gases. A grande desvantagem deste método é a necessidade de um grande intervalo de tempo para que vazamentos de menor grandeza sejam detectados, ocasionando grandes perdas de produto.

O método das ondas de pressão negativas é baseado no princípio de que quando um vazamento ocorre numa linha, uma rápida queda de pressão ocorre na posição do mesmo, originando uma onda de pressão negativa que se propaga à velocidade do som em ambos os sentidos. É possível determinar a existência e a localização aproximada do

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

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

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

Dentre todas as técnicas citadas, a detecção através de sensores acústicos é uma das que mais vem sendo utilizada e desenvolvida por pesquisadores e empresas para efetivamente realizar a detecção do vazamento e manter a integridade das paredes ao longo do duto. De acordo com Wiczorek (2003), através desta técnica é possível detectar pequenos vazamentos em um pequeno intervalo de tempo, além de apresentar a vantagem de poder ser aplicada em vários materiais com diferentes espessuras, além de estruturas em operação, à temperatura ambiente ou elevada.

O método de inspeção acústica, ainda segundo Wiczorek (2003), fundamenta-se no crescimento de uma descontinuidade provocado por uma tensão que irá emitir um sinal sonoro (ondas acústicas). Essas ondas viajam pela estrutura e fluidos, e são captadas por sensores posicionados ao longo do duto. A localização das descontinuidades pode ser estimada mediante os tempos de chegada dos sinais aos sensores. A localização precisa, assim como o tamanho e a orientação da descontinuidade, pode ser obtida com o auxílio de outras técnicas não-destrutivas.

A vantagem desse método é que ele pode fazer a supervisão de uma grande área da planta com a instalação de apenas alguns sensores.

O uso de filtros, para que o sinal não seja corrompido por ruídos de operação ou ambientais, e também técnicas de processamento de sinal são importantes para uma melhor sensibilidade e o sucesso do método (MACLEOD *et al.*, 1991).

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

Kupperman, Prine e Mathieson (1988) realizaram uma experiência na qual foi utilizado um sensor de emissão acústica capaz de detectar frequências na faixa de 100 kHz a 1MHz. O orifício utilizado para simular o vazamento foi de 0,5 mm. O sensor de emissão acústica, instalado na parede do vaso ou tubulação, capta vibrações geradas pelo escape do fluido, que são transmitidas através da estrutura. No entanto, sensores montados na superfície são igualmente sensíveis às vibrações geradas devido a uma operação normal da planta ou aos ruídos externos, o que dificulta uma correta detecção.

Streicher (1991) apresentou conceitos de um sistema de monitoramento acústico tanto de peças frouxas como de detecção e monitoramento de vazamentos e sua possível localização. O sistema permite um reconhecimento adiantado dos desvios de uma operação normal e possibilita uma rápida ação corretiva a fim de impedir danos ao ambiente e ao equipamento.

Kunze (1999) instalou um sistema de monitoramento acústico para vazamento no sistema de resfriamento de reatores nucleares em dezessete plantas nucleares na Rússia. O sistema foi projetado para encontrar falha em qualquer ponto do reator, em seu estágio inicial, para que ações corretivas fossem tomadas antes de acontecer a ruptura total. O sistema de monitoramento consistia em sensores ultra-sônicos (100 - 400kHz) onde o parâmetro de avaliação do sistema consiste em comparar continuamente os dados obtidos com valores previamente fixados. Caso o valor medido ultrapassasse o valor fixo, um alarme de vazamento era acionado.

Miller *et al.* (1999) propuseram uma técnica de emissão acústica para dutos enterrados onde em laboratório foram desenvolvidas técnicas e procedimentos de testes que caracterizavam diferentes tipos de vazamentos, bem como seus comportamentos, criando um sinal padrão

de referência. Assim, essas técnicas foram transferidas para campo minimizando esforços e custos quando comparadas com métodos de trabalho desenvolvidos somente em campo. Para que o sinal padrão de referência seja compatível com o sinal obtido em campo, o padrão de referência foi construído com o mesmo material e as mesmas características do duto em campo. Esse padrão de referência tinha dois sensores: um localizado no meio e outro numa das extremidades do duto. Na outra extremidade foi colocada uma mangueira com regulação de pressão líquido/gás e um transdutor de pressão. Todo esse aparato montado foi inserido dentro de um taque de acrílico transparente para fácil visualização da atividade. O tanque era também equipado com um dreno para regular a acumulação do líquido no material. A Figura 2 mostra o aparato experimental.

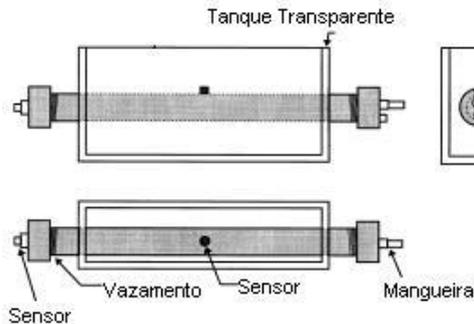


Figura 2: Aparato montado em laboratório para padrão de referência.

Fonte: Miller et al. (1999).

O sinal padrão de referência teve mais sucesso para identificação de pequenos vazamentos (na ordem de $1,26 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$). Quanto à localização do vazamento, foram utilizadas duas técnicas diferentes e ambas o localizaram com precisão de 0,3048 m.

Jiao *et al.* (2004) aplicaram a análise modal e a transformada wavelet para localizar fontes de ondas acústicas em placas finas de aço. A análise modal foi usada para conhecer as características de dispersão e atenuação dos vários modos de ondas elásticas na placa. O conhecimento desses modos possibilitou extrair a informação exata sobre a fonte que produz essa onda. A transformada wavelet foi usada para detectar o tempo de chegada, nos sensores, dessas ondas que se propagam através da estrutura. Os resultados mostraram que essa

técnica viabiliza a localização da fonte de emissão acústica com apenas um sensor, reduzindo o custo de testes de emissão acústica.

Shehadeh *et al.* (2006) utilizaram sensores acústicos para localizar e reconstruir as assinaturas dos sinais acústicos emitidos pelo duto nos domínios do tempo e da frequência. Várias técnicas, incluindo transformada wavelet, correlação cruzada e técnicas de filtragem foram aplicadas para obter o tempo de chegada para os vários modos do sinal. Os experimentos consistiram na simulação de um vazamento no duto, com comprimento de 5,5 m, 7,35 mm de espessura de parede e com os diâmetros de 169 e 48,4 mm. Dois sensores banda larga foram utilizados, sendo que o primeiro sensor foi colocado ao lado da fonte de vazamento, funcionando como “sensor gatilho”, e o segundo sensor foi variando sua posição aumentando de 20 cm nos primeiros 10 pontos e depois por 1 m até o fim do duto. Os dados foram capturados por uma placa de aquisição.

Os autores utilizaram cinco técnicas para estimar a localização do vazamento, sendo três convencionais (Correlação-Cruzada, Transformada *Wavelet* de Garbor e Método do Ponto Inicial) e duas propostas pelo autor (Método da Janela de Energia e Combinação da Transformada *Wavelet* e Correlação-Cruzada). A Tabela 3 mostra os resultados obtidos pela aplicação das técnicas.

Tabela 3: Distâncias estimadas pelos métodos entre o vazamento e o sensor.

Método	Distância do ponto onde ocorre o vazamento (m)				
	2,0	3,0	3,6	4,8	Erro (%)
Transformada Wavelet e Correlação-Cruzada	2,0	2,9	3,5	4,6	2,5
Janela de Energia	2,1	3,1	3,6	4,9	1,5
Correlação-Cruzada	2,0	2,9	3,4	4,5	4,0
Método do Ponto Inicial	2,0	3,3	3,8	4,8	4,0
Transformada Wavelet de Garbor	1,7	3,9	3,6	4,0	16

Fonte: Shehadeh *et al.* (2006).

Os dois novos métodos propostos pelo autor apresentaram os menores erros para estimar o local do vazamento.

Lapshin e Ovchinnikov (2004) apresentaram uma técnica para localizar os vazamentos em dutos através de sensores de emissão acústica instalados no casco dos dutos. Segundo os autores, as faixas características dos vazamentos são na frequência de 10-50 kHz. Os vazamentos foram identificados através da detecção dos ruídos pelos sensores instalados no duto. Os autores apresentam correlações numéricas e computacionais para localizar os vazamentos.

2.2 Processamento de sinais

A conversão de sinais analógicos para digitais é o processo que permite aos computadores digitais interagir com esses sinais de forma que os mesmos possam ser acessados e processados. O uso do computador para a execução de processamento de sinais analógicos é de fundamental importância, pois o mesmo processa informações matemáticas relativas ao sinal e captura o sinal analógico, transformando-o em informação digital. Isto é feito através do uso de interfaces especiais, normalmente chamadas de placas de aquisição de dados. Acopladas ao computador, essas placas convertem o sinal analógico em sinal digital, tornando-o, assim, um sinal discretizado, e, portanto, passível de ser manuseado dentro de um sistema computadorizado (SMITH, 2003).

2.2.1 Representação e quantização de Sinais

Os sinais provindos de fenômenos físicos são dados que estão sob a forma analógica e, para tê-los em forma digital, necessita-se de um conversor analógico-digital (A/D). A conversão A/D procura transformar certa tensão elétrica em uma informação correspondente digital e esta operação é necessária toda vez que uma tensão elétrica precisa ser armazenada e processada como informação em um computador (processamento discreto). No processo inverso, a conversão de uma informação digital em uma tensão elétrica, se dá o nome de conversão Digital/Analógica (D/A) (SMITH, 2003).

Desta forma, de acordo com Embree e Kimble (1991) quando o sinal analógico é convertido em eletricidade, através do transdutor utilizado, pode-se, convertê-lo em informação digital. Para isso, captura-se a tensão da corrente elétrica em um determinado tempo qualquer.

Entretanto, um registro de apenas uma tensão não é suficiente para que a informação contida em toda a onda seja obtida. Desta forma, são necessários diversos registros, em diversos momentos diferentes, para aproximar a informação contínua. Essa taxa temporal de medição das amostras é chamada de frequência de amostragem.

A Figura 3 (a e b) exemplifica um sinal analógico e o processo de digitalização do mesmo.

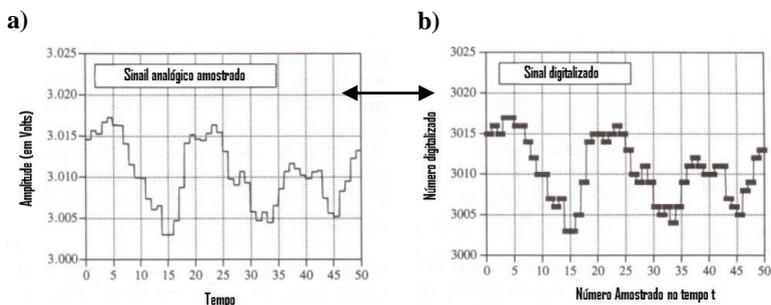


Figura 3: (a) Exemplo de sinal analógico e (b) exemplo do mesmo sinal digitalizado.

Fonte: Smith (2003).

Outro aspecto relevante é o nível de quantização dos sinais. De acordo com Embree e Kimble (1991, p. 47), a "quantização é o domínio da amplitude de um sinal analógico contínuo amostrado em um certo domínio de tempo." Essa discretização da amplitude é usualmente definida em termos de número de bits. Uma conversão de 12 bits, por exemplo, proporciona a representação de 2^{12} estados, ou, 4096 níveis de quantização. Cada um dos estados estará representando uma faixa de valores da amplitude. Cada valor discreto corresponde a uma faixa menor de valores contínuos, acarretando maior precisão (MALVINO, 1985).

Neste contexto, Tafner (1996) deu um exemplo de uma quantização com 256 níveis (8 bits de conversão) e uma amostragem de 6 Hertz (6 ciclos por segundo). O resultado desse processo está na Figura 4, onde se tem cada segundo dividido em 6 amostras. Cada amostra é um valor discreto que foi quantizado de forma a representar a tensão elétrica correspondente. A faixa da tensão do exemplo, de pico a pico é de 10 V (volts), estendendo-se de -5 a +5 V, foi convertida para uma tabela com variação de 256 estados (0 - 255). Esses estados de quantização devem representar toda a variação possível. Sendo 256

estados para 10 V, de -5 a +5 V, tem-se os primeiros 128 estados para a faixa negativa do sinal e os 128 estados seguintes para a faixa positiva. Dessa forma, de 0 a 128 representa-se o sinal de -5 a 0 V, e de 129 a 256 a tensão de 0,1 a 5 V.

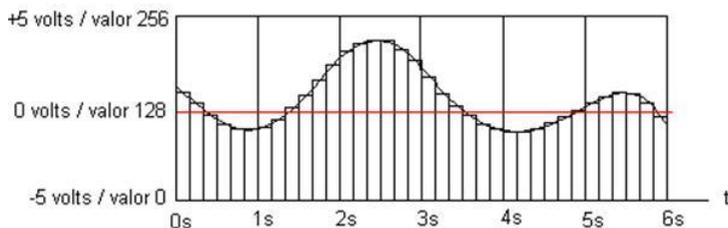


Figura 4: Onda contínua e amostragem
Fonte: Tafner (1996)

Assim, quanto mais parecida a onda da amostragem com a onda original, maior será a sua qualidade, o que significa, maior representatividade da informação original, pois é essa proximidade que aprova a qualidade da amostragem (RIBEIRO, 1980).

2.2.2 Teorema de amostragem de Nyquist

De acordo com Lathi (1987), o teorema da amostragem afirma que é possível representar um sinal analógico por uma série de valores discretos.

Desta forma, a Figura 5, apresentada por Smith (2003), mostra várias ondas senoidais. A linha contínua representa o sinal analógico antes da conversão A/D, enquanto os pontos representam o sinal já digitalizado. Na Figura 5(a) o sinal analógico tem uma conversão digital constante gerando uma onda de frequência zero. Como se pode observar os pontos do sinal digitalizado representam o sinal analógico real, portanto, pode-se dizer que a amostragem é apropriada. O mesmo pode ser observado para os sinais apresentados na Figuras 5(b) e na Figura 5(c) (SMITH, 2003).

Entretanto, na Figura 5(d) o mesmo não ocorre, pois, observa-se que os pontos não são capazes de representar corretamente o sinal analógico. Desta forma, de acordo com a definição do teorema de amostragem, na Figura 5(d) tem-se uma amostragem inapropriada. Observa-se que devido a essa amostragem ocorre uma alteração na

freqüência da onda senoidal, sendo que este fenômeno recebe o nome de *aliasing* (SMITH, 2003).

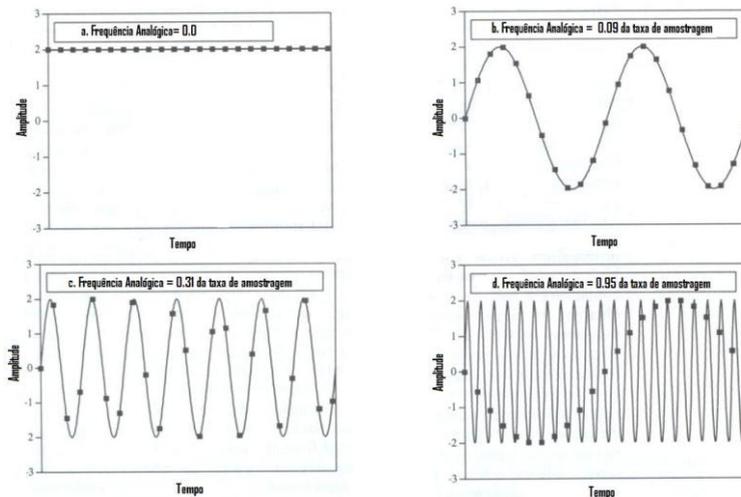


Figura 5: ((a), (b), (c) e (d)) Ilustrações de sinais analógicos e digitais de amostragem apropriadas e inapropriadas.

Fonte: Smith (2003).

De acordo com o teorema da amostragem, também conhecido como teorema de amostragem de Shannon ou teorema de amostragem de Nyquist, um sinal contínuo pode ser amostrado apropriadamente, somente se não existir componentes de freqüência acima da metade da taxa de amostragem. Exemplificando, uma taxa de amostragem de 2000 amostras/segundo requer que o sinal analógico seja composto por freqüências menores que 1000 ciclos/segundo (SMITH, 2003).

2.2.3 Transformada discreta de Fourier (TDF)

De acordo com Bae (1999), Jean-Baptiste-Joseph Fourier publicou no início do século XIX, *La Théorie Analytique de La Chaleur*, que as ondas (senoidais) constituem os elementos fundamentais de vibrações e ondas periódicas.

Neste contexto, a chamada análise de Fourier implica no fato de muitos sinais irregulares poderem ser observados numa superposição de muitos ritmos regulares, com várias amplitudes e freqüências. Em música, ela descreve como cada som pode ser analisado como uma

mistura de tons puros; em ótica, a luz em qualquer matiz pode ser sintetizada a partir das cores fundamentais do arco-íris. Os sinais passaram a ser analisados no domínio de Fourier, ou seja, no domínio da frequência. A decomposição em série evoluiu para a representação via transformada de Fourier e a maior parte dos estudos envolvendo sinais incorporou essa ferramenta (OLIVEIRA, 2007).

Neste item, a representação dos sinais discretos será feita através de funções ou sequências discretas $s(n)$, onde para cada valor da variável inteira s , atribui-se um valor complexo $s(n)$. Segundo Jenkins (1999), a função $S(k)$ implementa a transformada discreta de Fourier do sinal $s(n)$ e $s(n)$ implementa a transformada discreta inversa de Fourier de $S(k)$, através das seguintes equações:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad k = 0,1,\dots, N-1 \quad (1)$$

$$s(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S(k)e^{j2\pi kn/N} \quad n = 0,1,\dots, N-1 \quad (2)$$

O sinal $s(n)$ é uma sequência finita de comprimento N , ou é uma sequência periódica com período N . Independentemente de $s(n)$ ser uma sequência de comprimento finito ou periódico a TDF trata as N amostras de $s(n)$ como se fossem um período de uma sequência periódica.

A TDF foi utilizada neste trabalho para a análise espectral de frequência para o estudo da caracterização vibroacústica de vazamentos.

2.3 Redes neurais artificiais (RNA's)

Segundo Haikin (2001), uma rede neural é um processador paralelo maciçamente distribuído, constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso. Ela se assemelha ao cérebro em dois aspectos:

- a) o conhecimento é adquirido pela rede através de um processo de aprendizagem em seu ambiente;
- b) são utilizadas para armazenar o conhecimento, as forças de conexão entre neurônios conhecidas como pesos sinápticos.

O neurônio artificial é o elemento básico que forma uma rede neural artificial. Ele é conhecido também como elemento de processamento e simula o funcionamento de um neurônio biológico. A Figura 6 apresenta um modelo de neurônio artificial apresentado por Loesh e Sari (1996, p. 21).

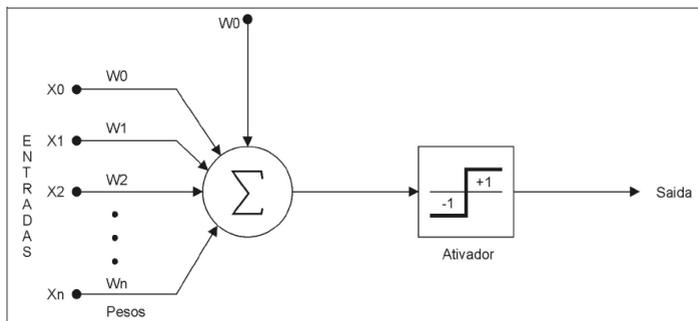


Figura 6: Modelo de neurônio artificial.

Fonte: Loesh e Sari (1996, p. 21).

Baseados no neurônio biológico, os elementos principais que constituem o neurônio artificial são: as entradas; os pesos sinápticos; a função de ativação ou função soma; e a função de transferência ou ativador. O neurônio possui um ou mais sinais de entrada. É através destas entradas que o neurônio recebe os estímulos a serem processados. Assim como ocorre no neurônio natural, no neurônio artificial todas as entradas são consideradas de maneira simultânea no momento do processamento. Não existe situação onde somente o valor de uma ou outra entrada é considerado. Os pesos são os valores que representam o grau de importância de cada entrada para o neurônio. É através da variação destes valores que se constrói o conhecimento. Os valores dos pesos são obtidos no momento do treinamento da rede neural.

A função de ativação antecede a função de transferência e tem como atribuição repassar o sinal obtido através das entradas à função de transferência. Em modelos mais simples de redes neurais esta função simplesmente realiza a soma dos valores das entradas multiplicados pelos respectivos pesos. A função de transferência analisa o valor gerado pela função de ativação e gera uma saída para o neurônio. A função muda conforme o modelo de rede utilizado. Uma das funções mais empregadas é a de sinal, representada graficamente na Figura 7, onde o valor obtido pela função de ativação é comparado com

determinado limiar. Conforme o resultado da comparação, a saída assume um entre dois valores predeterminados.

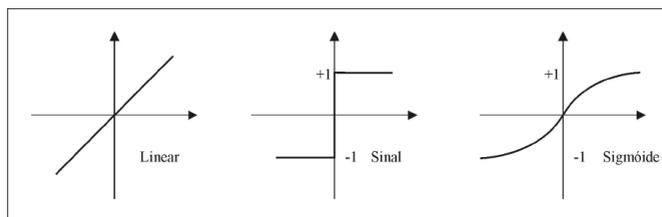


Figura 7: Gráficos de funções de transferência.

Em uma rede neural artificial os neurônios são agrupados em camadas. Tafner (1996) explica que os neurônios da camada de entrada não realizam processamento. Sua única função é armazenar a informação de entrada para ser repassada aos neurônios da próxima camada.

Uma rede neural artificial pode também possuir camadas intermediárias ou ocultas, que se situam entre a camada de entrada e a camada de saída. A estrutura destas camadas é igual à da camada de saída, porém não tem contato com o exterior. Segundo Medeiros (2003, p. 11) estas camadas tem como objetivo melhorar o desempenho da rede, aumentando a possibilidade de divisão do espaço de entrada de maneira não linear.

Por fim, tem-se a camada de saída. Além de realizar processamento através de seus neurônios esta camada também é responsável por repassar o resultado do processamento da rede ao mundo exterior. A quantidade de neurônios da camada de saída é igual ao número de saídas esperadas da rede. A Figura 8 ilustra uma esquematização das camadas de uma RNA.

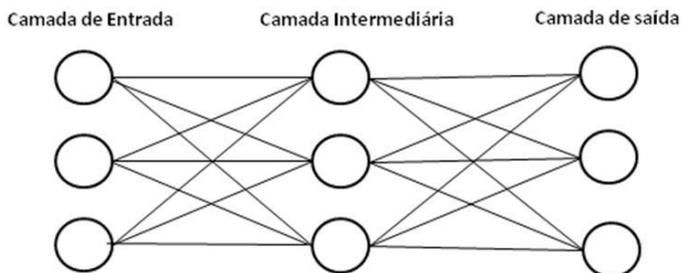


Figura 8: Camadas da rede neural.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada uma descrição detalhada do material utilizado, da estrutura experimental projetada, da metodologia aplicada aos experimentos e do desenvolvimento das RNA's utilizadas.

3.1 Material

3.1.1 Montagem da Bancada Experimental

Procurou-se construir a bancada experimental de forma que a mesma pudesse representar adequadamente um vazamento de petróleo ou gás conforme pode ocorrer na indústria. Por isso, foi descartada a utilização de válvulas para simular a abertura do vazamento. Empregou-se para tanto uma seção de duto feita de aço com 2 m de comprimento e 10 cm de diâmetro interno, com espessura da parede de 5,7 mm.

A Figura 9 apresenta a seção de duto suspensa munida de: um manômetro para monitoramento da pressão no interior da seção de duto; a mangueira para a admissão de ar comprimido, água ou óleo de soja; tampas de vedação nas extremidades; e um corte na lateral onde se encontra o orifício de vazamento. Na Figura 10 pode-se observar com detalhes o orifício de vazamento que mede 3 cm x 0,5 cm. Foram feitos 5 chanfros na seção de duto para fixação dos sensores de vibração.

A seção de duto ficava suspensa durante os experimentos para um maior isolamento da mesma de vibrações externas aos fenômenos de vazamento. A intenção em suspender a seção de duto baseou-se na técnica de Análise Modal. A Análise Modal experimental estuda os modos naturais de vibração das estruturas, pois uma descrição dinâmica completa de uma máquina ou estrutura requer a determinação das frequências naturais, formas modais e parâmetros do sistema (massas, rigidezes, e constantes de amortecimento equivalentes). Desta forma, para este estudo, suspendeu-se a seção de duto com a intenção de encontrar as frequências de vibração específicas dos fenômenos em estudo, minimizando-se a interferência de ruídos provenientes do meio ambiente. Além disso, os acelerômetros piezoelétricos foram fixados no casco da seção de duto de forma a medir apenas vibrações transversais ao seu eixo no plano horizontal; desta forma as únicas frequências de vibração não pertencentes ao fenômeno de vazamento eram as relativas ao movimento pendular da seção de duto, sendo as mesmas de baixa frequência e facilmente identificáveis.



Figura 9: Seção de duto utilizada no trabalho.

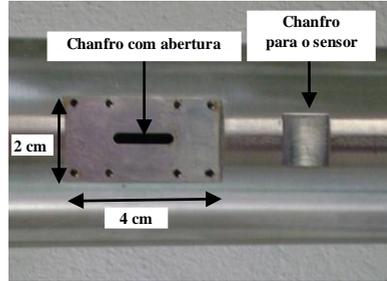


Figura 10: Detalhe dos chanfros para fixação da placa perfurada e do sensor de aceleração.

Foram confeccionadas cinco placas planas (Figura 11) com orifícios circulares de diâmetros: 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm e uma fenda de 0,5 mm x 30 mm, que eram parafusadas sobre o chanfro com abertura para os ensaios de vazamento. A espessura das placas era de 5 mm.

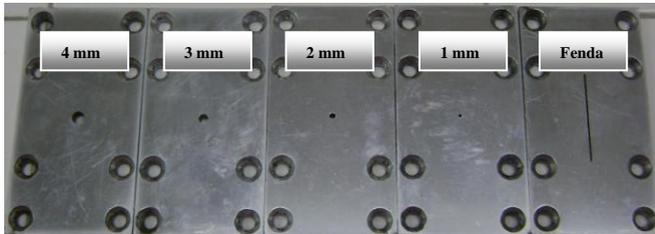


Figura 11: Placas planas com furos para os ensaios de vazamentos.

3.1.2 Especificações dos equipamentos

Seção de duto: foi utilizada uma seção de duto de metal com 2 m de comprimento, 10 cm de diâmetro interno e com espessura da parede de 5,7 mm, como detalhado acima.

Sensores de vibração: foram utilizados dois acelerômetros piezoelétricos, que fizeram a conversão da energia mecânica da onda elástica em energia elétrica, fabricados pela *Bruel & Kjaer*, modelo 4793.

Placa conversora Analógico/Digital/Analógico: foi utilizada a placa Analógico/Digital/Analógico (ADA) de 16 bits de resolução, modelo DT9618-A da *Data Translation*.

Condicionador e Amplificador de sinais: empregou-se um condicionador/amplificador de sinais fabricado pela *Bruel & Kjaer*, modelo 2693-A-0S2.

Manômetro: utilizou-se para monitoramento da pressão um manômetro analógico fabricado pela *Record* com faixa de indicação de até $9,8 \times 10^5$ Pa.

Fechadura eletromagnética: foi utilizada para acionar vazamentos, sendo fabricada pela Automatiza - Sistemas de Segurança e Automação. A Figura 12 mostra a fechadura utilizada e a forma de fixação da mesma na seção de duto.

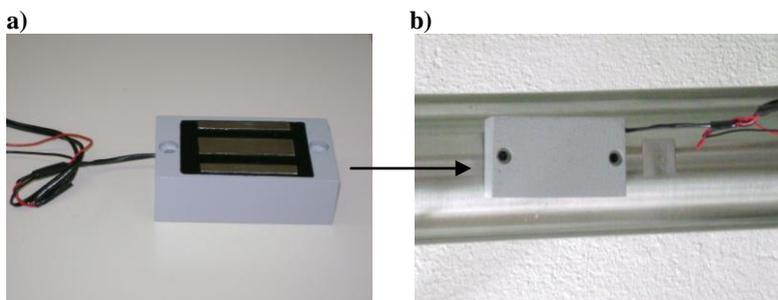


Figura 12: (a), (b) Fechadura eletromagnética utilizada no experimento e a mesma fechadura fixada na lateral da seção de duto, respectivamente.

A fechadura era fixada na lateral da seção de duto sobre a placa perfurada e liberada mediante interrupção da corrente elétrica para os ensaios de vazamento.

Microcomputador: o microcomputador utilizado na aquisição dos dados de vazamentos foi um *notebook* Sony Vaio® Intel® Core™ 2 Duo T5800 2 GHz, disco rígido de 250 GB e 3 GB de memória RAM.

Compressor: utilizou-se um compressor industrial de ar fabricado pela *Schulz* modelo CSL 20 BR de 2 cilindros.

Bomba de sucção a vácuo: utilizou-se uma bomba fabricada pela Fisatom, modelo 820, série 0925210, que foi posicionada sobre a seção de duto para análise das vibrações causadas pela mesma.

Peneira de separação de sólidos por vibração: utilizou-se um vibrador utilizado para agitação de peneiras. Ele foi posicionado sobre a seção de duto para a aquisição dos sinais de vibração gerados pelo mesmo.

3.1.3 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados (Figura 13) constituiu-se de dois acelerômetros, um condicionador e também amplificador de sinais, placa conversora ADA, microcomputador e programa de aquisição de dados. Esse sistema permite a aquisição em tempo real dos dados fornecidos pelos acelerômetros.

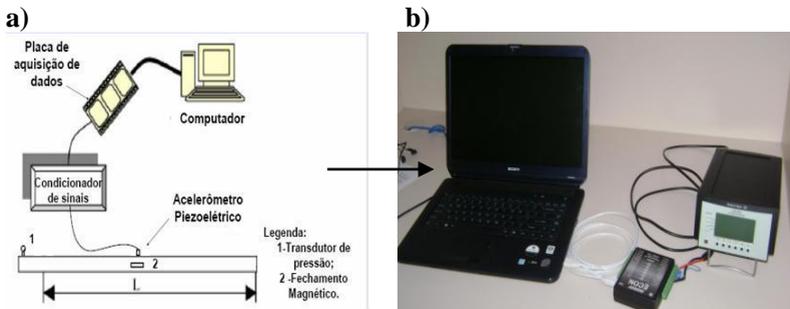


Figura 13: (a), (b) Esquema do sistema de aquisição de dados e foto do mesmo sistema, respectivamente.

3.1.3.1 Transdutores (acelerômetros piezoelétricos)

Atualmente, o transdutor que é usado quase que universalmente para medir a vibração é o acelerômetro piezoelétrico. Esse aparelho apresenta características gerais superiores às de qualquer outro tipo de transdutor de vibração. Possui gamas dinâmicas de frequências muito amplas, com boa linearidade em todas as faixas. É relativamente robusto e de confiança, de modo que suas características se mantêm estáveis por muito tempo.

O acelerômetro piezoelétrico consiste em uma pastilha de material piezoelétrico, geralmente um pedaço de cerâmica

artificialmente polarizado, que apresenta o efeito piezoelétrico típico. Quando submetido à pressão mecânica, quer por tensão, compressão ou cisalhamento, gera uma carga elétrica nas faces, a qual é proporcional à força aplicada.

Um transdutor ideal deve fornecer uma diferença de potencial diretamente proporcional ao deslocamento, velocidade ou aceleração no ponto de medida. Este sensor ideal deveria operar em todo o espectro de frequências sem introduzir qualquer ruído no sinal e sem perturbar o deslocamento da onda. De fato, tal sensor não existe e fez-se necessário optar por um que melhor se enquadrasse às necessidades da pesquisa, segundo as demandas de sensibilidade e faixa de frequências.

Para a captação dos sinais produzidos pelo vazamento foram utilizados dois acelerômetros piezoelétricos fabricados pela *Bruel & Kjaer* do modelo 4793 (Figura 14). A escolha destes acelerômetros foi realizada levando em consideração a faixa ampla de medição que os mesmos mediam e o custo relativamente baixo.

Todo acelerômetro *Bruel & Kjaer* é calibrado na fábrica sendo acompanhado pelo relatório completo da calibração. Quando os acelerômetros são guardados e utilizados dentro de seus limites, ou seja: quando não são submetidos a choques excessivos, nem temperaturas ou doses de radiação exageradas, etc., as suas características permanecerão praticamente imutáveis durante um longo período de tempo. Os ensaios têm demonstrado que a alteração das características é inferior a 2%, mesmo após vários anos de uso.

Além disso, o acelerômetro piezoelétrico é auto-gerador, de modo que não necessita de uma fonte de energia externa. Não tem peças móveis, que se desgastem e, finalmente, sua saída proporcional à aceleração pode ser integrada de modo a fornecer sinais proporcionais à velocidade e ao deslocamento.

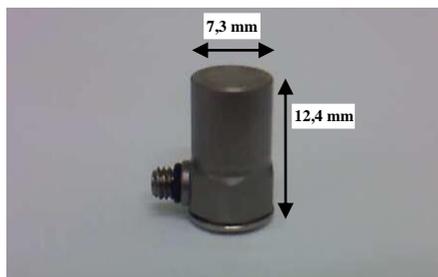


Figura 14: Acelerômetro piezoelétrico utilizado nos experimentos.

Os sistemas mecânicos costumam ter a maior parte de sua energia vibratória contínua numa faixa de frequência relativamente estreita que vai de 10 Hz a 1000 Hz, porém as medições geralmente são feitas até 20 kHz, pois é comum haver componentes de vibração interessantes nessas altas frequências. Os acelerômetros possuem uma faixa dinâmica útil (Figura 15), abaixo da sua frequência de ressonância.

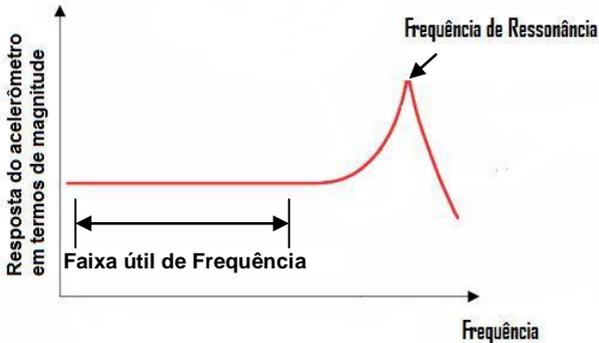


Figura 15: Faixa útil de frequência de um acelerômetro.

Fonte: Adaptado de Bruel & Kjaer (1998).

Os acelerômetros utilizados neste trabalho possuem uma faixa útil de 0 Hz a 25 kHz, sendo que a frequência de ressonância dos mesmos é de 53 kHz. Frequências maiores do que 53 kHz podem ser medidas, como mostra a Figura 15, mas perde-se a linearidade da resposta do sinal medido. Utilizou-se, também, cabos blindados de baixo ruído fabricados pela *Bruel & Kjaer* para fazer a conexão entre os acelerômetros e o condicionador/amplificador de sinais.

3.1.3.2 Condicionador de Sinais

Os condicionadores de sinais são circuitos eletrônicos capazes de adequar os sinais analógicos para a conversão digital. Os principais sub-componentes dos condicionadores são os amplificadores, filtros analógicos e isoladores. O condicionador de sinais utilizado no trabalho foi fornecido pela *Bruel & Kjaer*, modelo Nexus 2693-A-0S2. Ele é constituído por dois circuitos eletrônicos, o amplificador dos sinais provenientes do acelerômetro e o circuito responsável pelos filtros

passa-alta e passa-baixa, ambos utilizados para ajustar o sinal do acelerômetro para que possa ser adquirido pela placa de aquisição ADA.

Inicialmente, foram realizados ensaios de vazamento com ar comprimido utilizando o filtro analógico passa-baixa de 30 kHz e um passa-alta de 0,1 Hz. Entretanto, como pode ser observado na Figura 16, que apresenta a resposta em magnitude para os filtros analógicos passa-alta e passa-baixa do modelo Nexus 2693-A-0S2, ocorre a atenuação da magnitude para as altas frequências de vibração (maiores que 30 kHz), mas esta magnitude não é totalmente zerada.

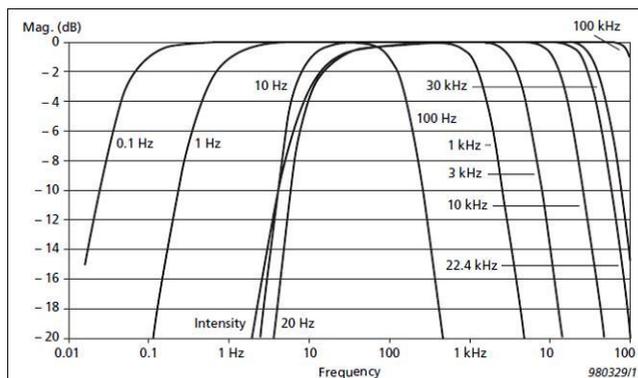


Figura 16: Resposta de amplitude característica para filtros passa-alta e passa-baixa do modelo Nexus 2693-A-0S2.

Fonte: Bruel & Kjaer (2007).

Após a realização de alguns ensaios de vazamento foi observada a ocorrência de altas frequências de vibração, sendo que as mesmas eram apenas atenuadas com a utilização do filtro passa-baixa de 30 kHz. Desta forma, concluiu-se que a utilização do filtro passa-baixa de 100 kHz e do passa-alta 0,1 Hz eram eficientes para os objetivos pretendidos com o trabalho, pois não havia necessidade de atenuação de um sinal para o qual o maior interesse era por em evidência todas as frequências de vibração que ocorriam com o fenômeno de vazamento.

3.1.3.3 Placa conversora ADA

A placa de aquisição de dados utilizada é do modelo 9816-A fabricada pela *Data Translation*. Ela é composta de 6 canais simultâneos de entrada analógica, 8 canais digitais de saída, 8 canais

digitais de entrada, 1 contador e 16 bits de resolução. A frequência da amostragem é 153 kHz para cada um dos canais.

3.1.3.4 Microcomputador

O microcomputador foi utilizado para receber os dados emitidos pela placa de aquisição de dados, arquivá-los em tempo real e apresentar os dados experimentais em forma gráfica. O microcomputador fez a interface entre o programa de aquisição de dados e a placa de aquisição.

O software utilizado para aquisição de dados foi o MATLAB 7.5[®], versão que é um ambiente computacional para visualização e computação numérica de alto desempenho.

3.1.3.5 Conversão do Sinal Analógico em Digital

Como o acelerômetro piezoelétrico gera sinais de natureza analógica é necessária uma conversão do sinal analógico em sinal digital para que estes sinais possam ser processados no programa de aquisição de dados.

O conversor AD de 16 bits foi preparado para receber um sinal de entrada analógica de tensão variável de -10 a 10 Volts podendo gerar números binários de 0 (000000000000) a 65536 (111111111111) dependendo do sinal de entrada. O sinal de saída do conversor é proporcional à amplitude do sinal de entrada. O programa de aquisição desenvolvido trabalha com o sinal digital na forma de número decimal equivalente, ou seja, a programação é feita em número decimal equivalente ao sinal digital.

Para -10 Volts na entrada do conversor, tem-se o número decimal equivalente 0 e para 10 Volts, tem-se o número decimal equivalente a 65536. A relação entre a TA (tensão de entrada) e o ND (número decimal) é linear conforme a equação abaixo:

$$\frac{ND}{65536} = \frac{TA + 10}{20} \quad (3)$$

Após a conversão, o número decimal equivalente foi transformado em unidades de tensão (Volts).

3.1.3.6 Teste de funcionamento do sistema de aquisição de dados

Para verificar o funcionamento da instrumentação realizou-se um teste em que o acelerômetro foi fixado na saída da caixa de som do computador (Figura 17).



Figura 17: Montagem do teste de verificação.

Uma onda senoidal, com frequência de 2,093 kHz, na forma de nota musical (dó sétima) foi emitida. O sinal foi medido e através da TDF obteve-se o espectro de frequências do mesmo (Figura 18).

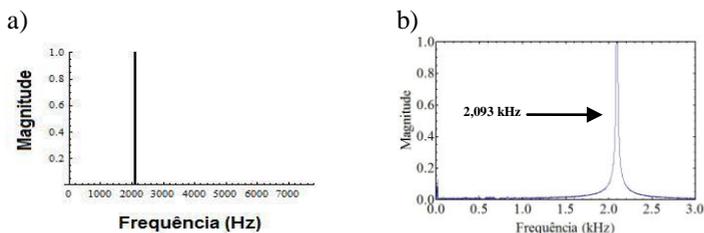


Figura 18: (a) Espectro de frequência real de uma onda senoidal com frequência de 2,093 kHz e (b) espectro de frequência para o sinal da onda senoidal reproduzido pelo acelerômetro com frequência de 2,093 kHz.

A frequência da onda senoidal (2,093 kHz) pôde ser claramente reproduzida (Figura 18 (b)) atestando, portanto, a confiabilidade do sistema de medição utilizado nos experimentos.

Em seguida, novamente a nota musical (dó sétima), mas agora na forma de onda triangular com frequência de 2,093 kHz foi emitida. A Figura 19 apresenta o espectro real da onda emitida e o espectro reproduzido através do teste, respectivamente.

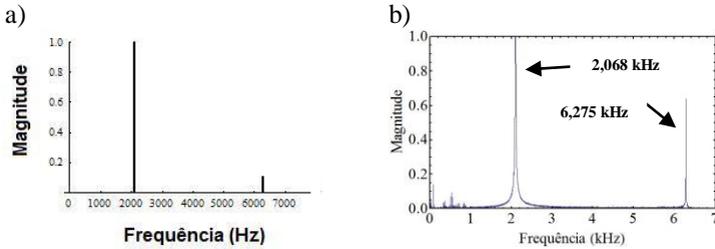


Figura 19: (a) Espectro de frequência real de uma onda triangular com frequência de 2,093 kHz e (b) espectro de frequência reproduzido através do teste para o sinal da onda triangular.

A Figura 19 (a e b) mostra que os espectros não são idênticos, mas as frequências reproduzidas são próximas dos valores reais, atestando uma confiabilidade para as medições.

Para testar a resposta do sensor às maiores frequências (maiores que 7 kHz), emitiu-se uma onda senoidal de frequência 15 kHz, e o espectro pode ser visto na Figura 20.

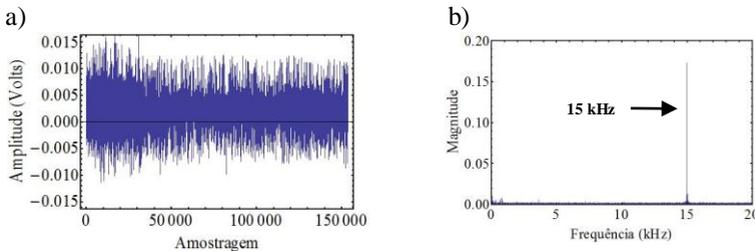


Figura 20: (a) Sinal de uma onda senoidal com frequência de 15 kHz e (b) espectro de frequência para o sinal da onda senoidal.

A frequência de 15 kHz pôde ser observada, ratificando novamente a confiabilidade do sistema de medição utilizado, mesmo para frequências maiores do que as testadas inicialmente.

3.1.3.7 Determinação da velocidade do som no duto

Com o intuito de determinar a velocidade de propagação do som na seção de duto foram realizadas medidas afins. Analisaram-se as respostas simultâneas ao longo do tempo, de dois acelerômetros posicionados com distância conhecida entre ambos, durante um ensaio de vazamento. Assim, foi possível determinar uma média do tempo para

o som percorrer essa distância, obtendo-se de forma aproximada a diferença no tempo de picos correspondentes dos dois sinais. A distância entre os acelerômetros foi de 60 cm. A Figura 21 mostra os sinais utilizados em função do tempo.

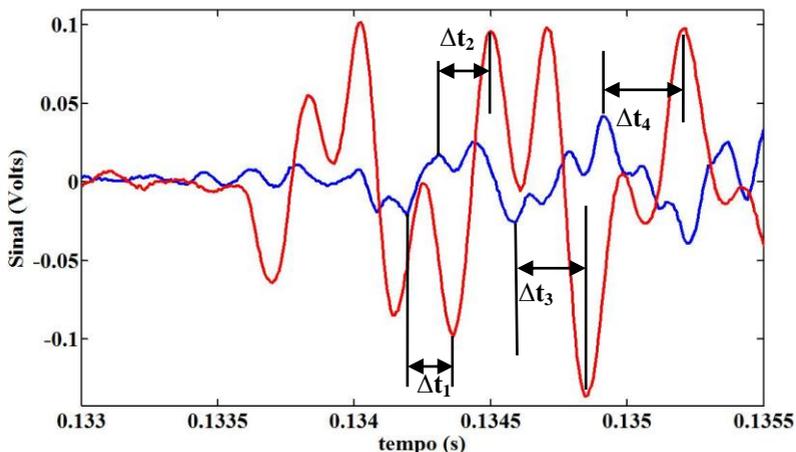


Figura 21: Resposta dos sensores ao longo do tempo resultante de um golpe com instrumento metálico.

O valor aproximado calculado da velocidade transversal de propagação do som na seção de duto foi de 3000 m/s, sendo que segundo Aldred (1972), o valor da velocidade de propagação transversal do som no aço é 3100 m/s. Este método de determinação da velocidade do som na seção de duto mostrou-se pouco preciso, pois devido aos ruídos presentes no sistema, as distâncias entre os picos correspondentes são de difícil determinação, prejudicando o cálculo da velocidade de propagação da onda.

3.2 Procedimentos experimentais

Os experimentos foram realizados com a seção de duto suspensa. Fixaram-se os acelerômetros na superfície dos chanfros de forma que os mesmos ficassem em perfeito contato com a superfície externa do duto. Posteriormente, instalava-se o manômetro e a mangueira de entrada de ar.

Foram realizados experimentos pressurizando a seção de duto a pressões $1,96 \times 10^5$, $5,9 \times 10^5$ e 10 Pa. Ensaios de vazamento com ar

comprimido, água e óleo de soja foram executados através dos cinco furos nas placas parafusadas sobre o chanfro lateral perfurado do duto. Os vazamentos foram liberados através de uma fechadura eletromagnética ou alternativamente, para vazamentos de ar comprimido, pela liberação manual de parafina aplicada como vedação sobre o orifício de vazamento.

3.2.1 Ensaios com ar comprimido

Os ensaios de vazamento com ar comprimido, tanto utilizando parafina quanto a fechadura eletromagnética para vedação, consistiram inicialmente no posicionamento de um dos acelerômetros a distância de 50 cm (chanfro 2) do orifício de vazamento, conforme Figura 22. Para todos os ensaios de vazamento, independentemente do fluido de vazamento, e não vazamento realizados neste trabalho, utilizaram-se um filtro analógico passa-baixa de 100 kHz e um filtro analógico passa-alta de 0,1 Hz, sendo que os sinais obtidos do acelerômetro foram amplificados em $3,16 \text{ mV/m.s}^{-2}$.

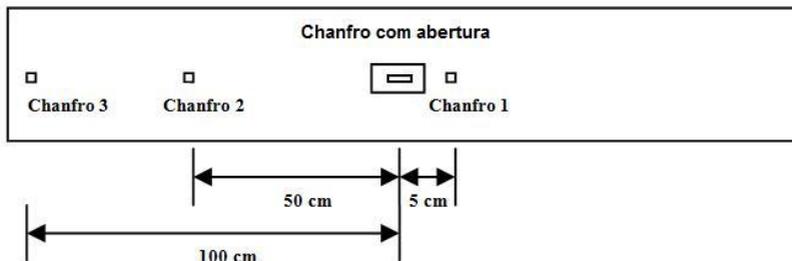


Figura 22: Esquema do posicionamento dos chanfros na lateral da seção de duto.

Na primeira fase de experimentos foram realizados testes utilizando a fechadura eletromagnética como vedação dos orifícios; parafusava-se uma das placas de orifícios na lateral do duto e vedava-se o orifício com a instalação da fechadura eletromagnética. A seção do duto era, então, pressurizada até a pressão desejada, iniciando-se a aquisição de dados momentos antes de ser liberado o vazamento.

Para os testes realizados utilizando-se a parafina como vedação dos orifícios de vazamento, as placas de orifícios eram previamente

vedadas de forma a suportar a pressão máxima de $5,9 \times 10^5$ Pa e parafusadas na lateral do duto. A seção do duto era, então, pressurizada até a pressão desejada, após o que, iniciava-se a aquisição de dados e aguardava-se o início do vazamento. A Tabela 4 resume os ensaios realizados utilizando a fechadura eletromagnética ou parafina como vedação dos orifícios.

Tabela 4: Ensaios de vazamentos utilizando a fechadura eletromagnética ou parafina para vedar os orifícios de vazamento.

Diâmetro do orifício de vazamento (mm)	Pressão (Pa)
4	$1,96 \times 10^5$
	$5,9 \times 10^5$
3	$1,96 \times 10^5$
	$5,9 \times 10^5$
2	$1,96 \times 10^5$
	$5,9 \times 10^5$
1	$1,96 \times 10^5$
	$5,9 \times 10^5$
Fenda 0,5 mm x 30 mm	$1,96 \times 10^5$
	$5,9 \times 10^5$

Posteriormente, realizaram-se ensaios fixando um acelerômetro nas diferentes posições de chanfro disponíveis (chanfros 1, 2, 3, 4 e 5). A Figura 23 detalha o posicionamento dos chanfros presentes no lado oposto ao orifício de vazamento. A seção de duto foi pressurizada a uma pressão $1,96 \times 10^5$ Pa e numa segunda etapa a $9,8 \times 10^5$ Pa. Para cada uma das posições dos chanfros, utilizaram-se, alternadamente, as 5 placas de vazamento disponíveis.

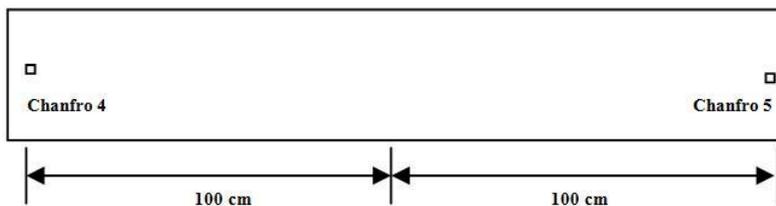


Figura 23: Esquema do posicionamento dos chanfros no lado oposto ao orifício de vazamento na seção de duto.

Realizou-se um ensaio de vazamento com ar comprimido, mas com a seção de duto parcialmente preenchida com 6 litros de água líquida à temperatura ambiente. Procurou-se assim verificar se essa alteração no sistema provocaria mudanças nos valores de frequências de vibração características observadas anteriormente quando o duto era preenchido unicamente com ar comprimido. Utilizou-se uma placa com orifício circular de 4 mm, pressurização da seção a $5,9 \times 10^5$ Pa e a fechadura eletromagnética para a liberação do vazamento.

Finalmente, para investigar se a espessura das placas com furo influenciava nas frequências de vibração que ocorriam, realizou-se um experimento com ar comprimido vazando pela entrada, onde a mangueira de admissão de ar comprimido era instalada na seção de duto. A fechadura eletromagnética foi instalada e o acelerômetro piezoelétrico foi fixado no chanfro 2. Em seguida, a seção de duto foi pressurizada a $1,96 \times 10^5$ Pa, fechando-se a válvula e retirando-se a mangueira de entrada de ar. Iniciou-se então a aquisição de dados e o vazamento foi acionado através da abertura da válvula de admissão de ar.

3.2.2 Ensaio com água

Os ensaios de vazamento com água foram realizados com um dos acelerômetros à distância de 50 cm da posição do vazamento, conforme já detalhado na Figura 22.

Sequencialmente, cada uma das placas de orifício era parafusada na lateral do duto, sendo em seguida instalada a fechadura eletromagnética. A seção do duto era, então, preenchida completamente com água e conectava-se a mangueira de entrada do ar comprimido. Posteriormente, após iniciada a aquisição de dados, abria-se a válvula do ar para compressão da água e o vazamento era liberado. A pressão utilizada foi de 10 kg/cm^2 em todas as trocas das placas de orifício. A aquisição de dados foi realizada para 10 s, mas nos resultados é apresentado 1s de dados que corresponde apenas ao instante inicial de vazamento, somente de água.

3.2.3 Ensaio com óleo de soja

Os ensaios de vazamento de óleo de soja foram realizados com um dos acelerômetros na mesma posição utilizada para os vazamentos de água (chanfro 2).

Os procedimentos dos ensaios utilizando óleo de soja foram realizados de maneira idêntica aos procedimentos utilizados para os ensaios com água como fluido de vazamento.

3.2.4 Eventos de não vazamento

Alguns eventos de não vazamento foram realizados para buscar, através do espectro de frequências, diferenças nos espectros referentes às frequências de vibração dos casos de vazamentos e de não vazamento. Para os experimentos simulando situação de não vazamento a seção de duto foi suspensa e o manômetro e a mangueira para a entrada de ar foram instalados como nos experimentos em que foram testadas situações de vazamento.

A Tabela 5 detalha os ensaios em situações de não vazamento.

Tabela 5: Descrição das situações de não vazamento consideradas.

Situações de não vazamento	Descrição
1	Mediu-se o ruído do ambiente, mantendo-se a pressão de $5,9 \times 10^5$ Pa no interior da seção de duto.
2	Golpeou-se uma vez a seção de duto com instrumentos metálicos em diferentes pontos.
3	Golpeou-se uma vez o interior da seção de duto com instrumentos metálicos em diferentes pontos.
4	Golpeou-se seguidas vezes a seção de duto com instrumento metálico.
5	Abriu-se a válvula para a entrada de ar e registrou-se o ruído de pressurização da seção de duto.
6	Suspendeu-se a seção de duto, iniciou-se a medição e movimentos pendulares foram aplicados na mesma.
7	Suspendeu-se a seção de duto, que foi preenchida completamente com água, em seguida iniciou-se a medição e movimentos pendulares na direção axial foram aplicados na seção de duto.
8	Suspendeu-se a seção de duto, que foi preenchida até a metade do volume com água, em seguida iniciou-se a medição com movimentos pendulares na direção axial aplicados na seção de duto.
9	Suspendeu-se a seção de duto, fixou-se sobre ela uma bomba de sucção a vácuo (geradora de um ruído de 69 dB à 1m de distância) em funcionamento e registrou-se o sinal.
10	Suspendeu-se a seção de duto, fixou-se sobre ela uma Peneira de separação de sólidos por vibração em funcionamento e registrou-se o sinal.

3.3 Desenvolvimento das RNA`s

3.3.1 Experimentos para treinamento e validação das redes

As redes neurais necessitam de um grande número de dados do processo para seu treinamento. Também, é necessário que esses dados contenham informações suficientemente representativas do fenômeno para que o desempenho da RNA seja satisfatório.

Para os treinamentos e aprendizados das RNA's foi utilizado o pacote MATLAB 7.5[®], versão que é um ambiente computacional para visualização e computação numérica de alto desempenho.

Neste contexto, foram realizados 900 ensaios para o treinamento e validação das RNA's. A aquisição dos dados de vazamento foi de 1 segundo para cada ensaio. A mesma sequência de pressurização, acionamento da aquisição de dados e liberação do vazamento, descrita anteriormente, foi adotada em todos os casos.

Para o treinamento da RNA foram utilizados os dados de 700 ensaios, sendo que dos mesmos, 400 eram situações de vazamento de ar comprimido e 300 situações de não vazamento.

Para cada um dos furos de vazamentos disponíveis foram realizados 40 ensaios a $1,96 \times 10^5$ Pa e 40 ensaios a $5,9 \times 10^5$ Pa, totalizando 80 ensaios para cada um dos orifícios que somados geraram os 400 ensaios totais de vazamento.

Dos 300 ensaios de eventos de não vazamentos, 150 consistiram em golpes no casco, 75 eram sinais de pressurização da seção de duto e 75 eram sinais de ruídos do ambiente.

Para validação da RNA treinada foram utilizados dados de 100 ensaios de vazamentos que consistiam em 10 ensaios a $1,96 \times 10^5$ Pa e 10 ensaios a $5,9 \times 10^5$ Pa para cada um dos orifícios. Os 100 eventos de não vazamento utilizados para a validação da rede consistiram de 10 eventos de golpe no casco, 25 eventos de pressurização e 25 eventos de ruídos do ambiente.

3.3.2 Seleção das variáveis de Entrada/Saída

No desenvolvimento de RNA's não são todas as variáveis adquiridas que são úteis em um processo, pois a presença de variáveis irrelevantes pode representar uma fonte de perturbação e ruído, e pode conduzir a um sistema com deficiência na sua representação.

A seleção dos dados de entrada foi realizada de modo a identificar, por meio da magnitude do sinal obtido, características de cada sinal que pudessem descrevê-los e diferenciá-los claramente, para os ensaios de vazamento de ar e as situações em que não ocorriam vazamentos, relativamente às frequências características de cada um desses eventos.

Para a seleção dos dados de entrada da rede foi realizada a seguinte operação:

- a) realizou-se a aquisição de um segundo de dados para cada situação de vazamento e de não vazamento;

- b) aplicou-se a TDF em cada um dos sinais de 1 s;
- c) efetuou-se a multiplicação do número complexo resultante pelo seu número complexo conjugado;
- d) aplicou-se a raiz quadrada ao número real obtido;
- e) posteriormente, dividiu-se por dois a quantidade de números reais obtidos;
- f) foram selecionados 40 dados igualmente espaçados dentro de todo o espectro de frequências, excluindo o primeiro dado, para treinamentos e validações;
- g) finalmente, dividiu-se o espectro de frequências em 77 partes contendo valores de magnitude da TDF, em cada uma das partes pegou-se o maior valor de magnitude obtido, foram selecionados dos 77 dados os 40 dados de maior valor para treinamentos e validações.

Com as operações descritas acima, buscou-se através dos dados obtidos a descrição do sinal inteiro com a menor quantidade de dados possíveis para um melhor processamento.

Os dados de saída das RNA's foram definidos, através de uma função sigmóide, de forma que o número 0 indicava não vazamento e o número 1 indicava vazamento.

3.3.3 Arquitetura e treinamento das RNA's utilizadas

A arquitetura da RNA utilizada no trabalho consistiu em: uma rede neural do tipo *feedforward* multicamadas (*multilayer feedforward networks*) que utiliza o algoritmo de aprendizado *backpropagation* (ajusta automaticamente os pesos) na etapa de treinamento. As camadas intermediárias foram compostas por funções de ativação do tipo sigmóide (Equação 4). O algoritmo de otimização para o treinamento foi o *Levenberg-Marquardt* (LM) que, segundo Hagan et al. (2003), permite uma rápida convergência de treinamento para a RNA.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4)$$

A determinação do número de neurônios nas camadas intermediárias foi realizada através de tentativas, sempre buscando redes com poucos neurônios escondidos e com uma boa capacidade de generalização. Não existe um critério geral que permita definir o número

de neurônios na camada intermediária. Em geral, redes neurais artificiais com poucos neurônios escondidos são preferidas, uma vez que elas tendem a possuir um melhor poder de generalização, reduzindo o problema de sobre-ajuste ou excesso de treinamento (*overfitting*). A estratégia de escolha da quantidade de neurônios na camada intermediária foi encontrar a quantidade mínima suficiente para um desempenho aceitável.

No código do algoritmo da rede neural, vários parâmetros foram definidos, tais como: tempo de visualização, erro mínimo, limite de iterações, entre outros.

3.3.4 Avaliação das RNA`s

No próprio algoritmo de treinamento da rede criada foi definido o percentual de dados que foram destinados para o treinamento e validação, além do mesmo realizar a verificação do ponto de melhor desempenho da rede, através do valor do erro médio quadrático (EMQ). A avaliação da rede com os dados utilizados no treinamento consistiu na verificação do seu desempenho para a ocorrência de um sinal de vazamento ou um de não vazamento. Os valores de saída da RNA (0 ou 1) eram comparados com os ensaios de vazamento (1) e os eventos de não vazamento (0).

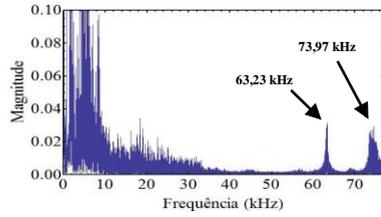
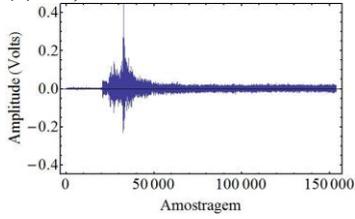
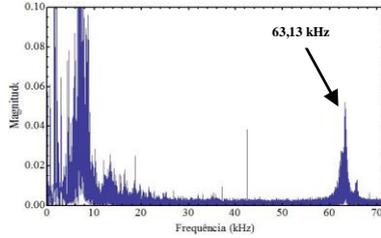
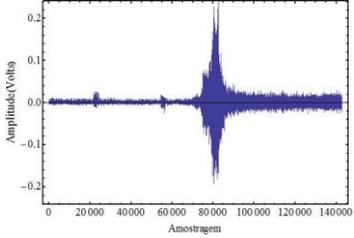
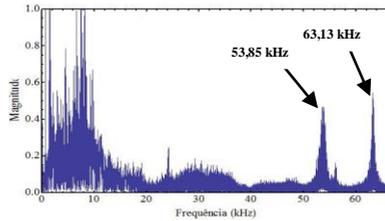
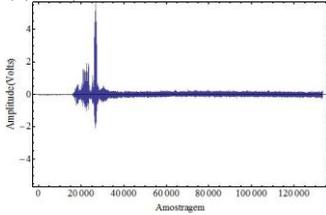
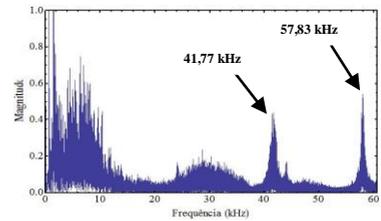
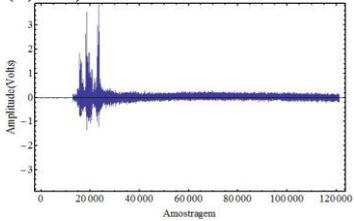
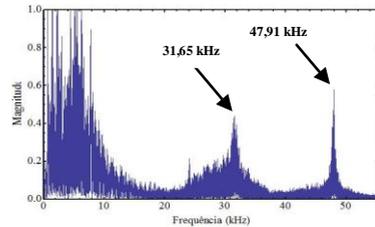
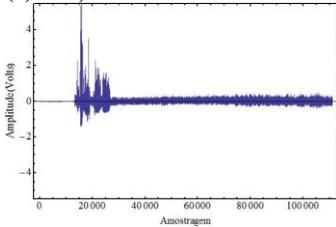
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos com a bancada experimental descrita no capítulo anterior, apresentando-se ensaios de vazamento de ar comprimido; água; óleo de soja; comparando esses resultados com ensaios envolvendo situações de não vazamento. Adicionalmente, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com o treinamento e a validação das RNA's utilizadas para detectar a presença ou não de vazamento de ar comprimido.

4.1 Manifestação do fenômeno de *aliasing*

Ainda na fase inicial da realização dos experimentos houve dúvidas acerca de certas frequências de vibração obtidas utilizando ar comprimido como fluido de vazamento. Essas frequências estavam acima da faixa de confiabilidade linear dos acelerômetros, ou seja, acima da frequência de ressonância dos mesmos e não era possível garantir se a taxa de amostragem era suficiente ou ocorria *aliasing* (“rebatimento”) com essas frequências. Para esclarecer essas dúvidas, realizaram-se 7 experimentos com o orifício de vazamento de 4 mm a pressão de $5,9 \times 10^5$ Pa, variando-se a taxa de amostragem em 153,8; 140,2; 133,3; 121,2; 111,1; 100,0; 90,9 kHz. A seção de duto foi pressurizada, os vazamentos foram liberados através da fechadura eletromagnética e o tempo de aquisição de dados foi de um segundo. Pôde-se observar, desta forma, a influência da variação da taxa de amostragem e se ocorria ou não o *aliasing*.

Na Figura 24 são apresentados os sinais e seus respectivos espectros de frequências para cada uma das amostragens testadas.

(a) 153,8 kHz – 4mm**(b) 140,2 kHz – 4mm****(c) 133,3 kHz – 4mm****(d) 121,2 kHz – 4mm****(e) 111,1 kHz – 4mm**

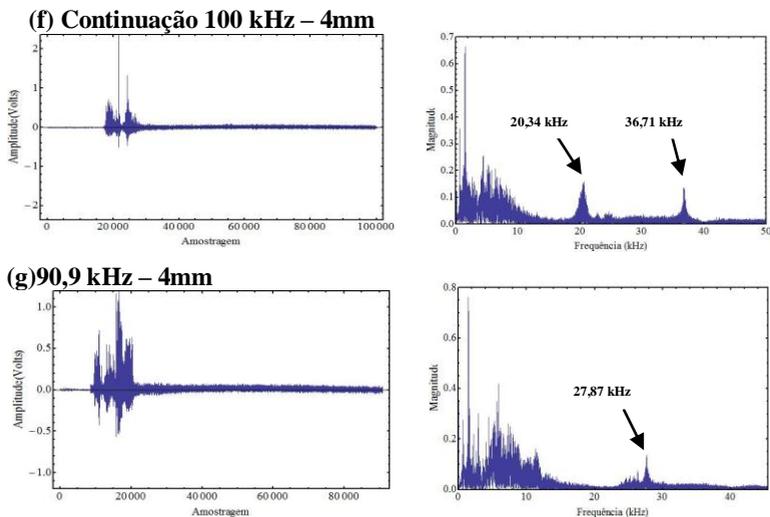


Figura 24: (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g) Sinal em Volts e respectivo espectro de Fourier com taxa de amostragem 150, 140, 130, 120, 110, 100 e 90 kHz, respectivamente.

Concluiu-se que a frequência identificada próxima de 63 kHz não é resultado de *aliasing*, pois se observou que ocorre o “rebatimento” da mesma apenas quando a taxa de amostragem é insuficiente (121,2 kHz). Assim, no espectro de frequências obtido para a amostragem de 120 kHz (Figura 24 (d)) a frequência encontrada é de 57 kHz, mas se trata na verdade da frequência de 63 kHz, pois como a taxa de amostragem é de 120 kHz a mesma aparece no espectro, mas como um “rebatimento” da frequência real.

Para a frequência próxima de 74 kHz, concluiu-se que a mesma é um “rebatimento” de uma frequência próxima de 80 kHz. Na amostragem de 140,2 kHz não se pode observar a frequência, pois as frequências se sobrepõem a 63 kHz. Entretanto, na amostragem de 133 kHz, observa-se que a frequência de 53,85 kHz é o “rebatimento” da frequência de 80 kHz.

Ainda, para a amostragem de 133,3 kHz, realizando a subtração de 53,85 kHz da frequência do limite superior correspondente a 66,65 kHz, obtém-se 12,8 kHz que, somado a 66,65 kHz, fornece 79,45 kHz, cujo valor corresponde aproximadamente à frequência real de vibração. O mesmo cálculo pode ser realizado para as frequências de amostragem menores e o mesmo resultado será obtido, concluindo-se, portanto, que a real frequência de vibração é 80 kHz. Neste trabalho, para os ensaios

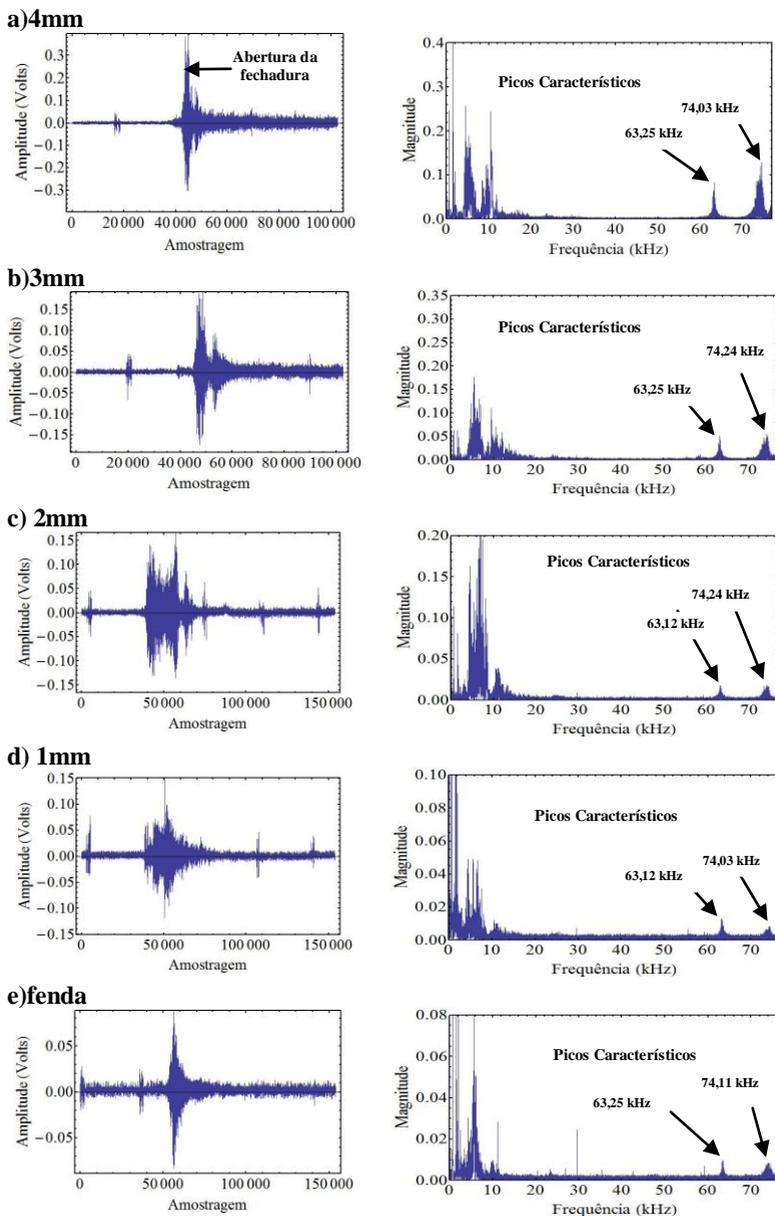
utilizando ar comprimido, sempre que o pico de frequência próximo a 74 kHz aparecer no espectro de frequências, o mesmo será citado como sendo 80 kHz, pois esta é a frequência real de vibração.

4.2 Vazamentos de ar comprimido

O estudo foi realizado utilizando uma pressão menor ($1,96 \times 10^5$ Pa) e, posteriormente, pressões maiores ($5,9 \times 10^5$ e $9,8 \times 10^5$ Pa) para que a metodologia fosse aplicada sob diferentes condições de operação. Além disso, na grande maioria dos vazamentos que ocorrem na indústria de petróleo e gás, o vazamento provém inicialmente de orifícios muito pequenos e quase imperceptíveis pelas principais metodologias de detecção utilizadas. Partiu-se do pressuposto de que, se fosse possível detectar frequências de vibrações características do fenômeno de vazamento a baixas pressões, também o seria para pressões mais elevadas. Desta forma, estudaram-se, inicialmente, as frequências de vibração pressurizando a seção de duto com ar comprimido e utilizando a fechadura eletromagnética para a liberação do vazamento a $1,96 \times 10^5$ Pa.

A Figura 25, a seguir, mostra os sinais (em Volts) em função da amostragem e ao lado o sinal tratado através da TDF, gerando-se os respectivos espectrogramas de frequências para cada um dos orifícios circulares de vazamentos (diâmetros: 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda de 0,5 mm x 30 mm.

Assim que inicia o vazamento, observa-se um pico no sinal resultante da liberação da fechadura. A partir do início do vazamento propriamente dito, a amplitude do sinal declina rapidamente, estabilizando-se em seguida, segundo uma despressurização relativamente lenta do duto. O mesmo comportamento foi observado para todos os testes utilizando a fechadura eletromagnética para vedação.



Observou-se que, em todos os vazamentos com os diferentes orifícios, dois picos característicos sempre foram observados em 63 e 74 kHz. Entretanto, a frequência de vibração de 74 kHz trata-se, na realidade, da frequência de 80 kHz, como já discutido anteriormente. A taxa de amostragem é inferior à necessária e, portanto, ocorre o fenômeno de *aliasing*. Na sequência da discussão dos resultados essa frequência será sempre tratada pelo seu valor real e não pelo valor que aparece rebatido no espectro.

Para os orifícios circulares, observou-se que as frequências características de vibração são as mesmas, mas com a diminuição do diâmetro simulado a magnitude do sinal também diminui, mesmo com a pressão sendo idêntica para todos os casos ($1,96 \times 10^5$ Pa). Foi possível detectar essas frequências de vibração, ainda que com baixa magnitude, para o orifício de 1 mm, mostrando a viabilidade da técnica para pequenos vazamentos.

Posteriormente, foram estudadas as frequências de vibração obtidas a $5,9 \times 10^5$ Pa. A Figura 26 mostra os sinais (em Volts) em função da amostragem com seus respectivos espectrogramas de frequências para cada um dos orifícios circulares de vazamentos (diâmetros: 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda de 0,5 mm x 30 mm.

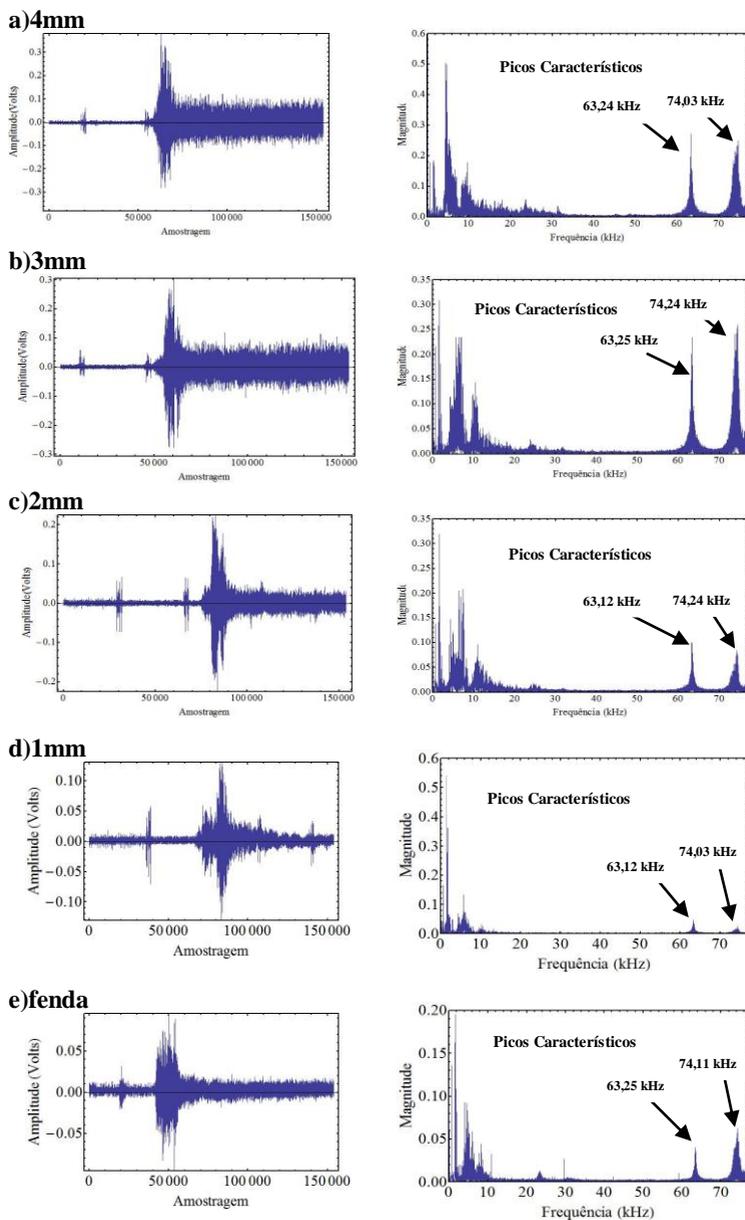


Figura 26: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências para os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $5,9 \times 10^5$ Pa.

Os resultados obtidos com a pressurização da seção duto à $5,9 \times 10^5$ Pa mostraram que para todos os orifícios as frequências características de vibração oriundas do vazamento são 63 e 80 kHz, igualmente com redução da magnitude do sinal à medida que furos menores são empregados. Os resultados encontrados para a fenda, para as duas pressurizações ($1,96 \times 10^5$ e $5,9 \times 10^5$ Pa), confirmam que mesmo para furos não circulares, as vibrações produzidas pelo vazamento de ar comprimido apresentam picos a 63 e 80 kHz.

Comparativamente, para a pressurização de $5,9 \times 10^5$ Pa foi possível observar no espectro de frequências magnitudes maiores (para todos os orifícios de vazamento) do que as encontradas para a pressurização de $1,96 \times 10^5$ Pa, devido à intensidade do sinal obtido, mas os picos são praticamente os mesmos, como pode ser observado nas Figuras 27 e 28, à título de exemplo.

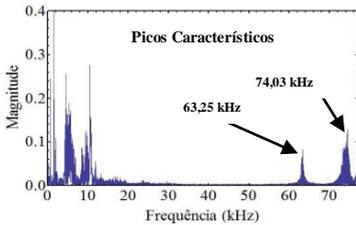


Figura 27: Espectro de frequências para o orifício circular de diâmetro 4 mm, pressurizando à $1,96 \times 10^5$ Pa.

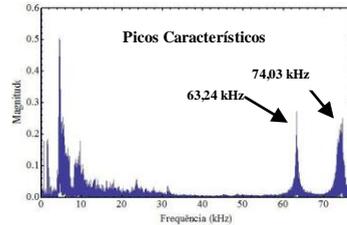


Figura 28: Espectro de frequências para o orifício circular de diâmetro 4 mm, pressurizando à $5,9 \times 10^5$ Pa.

Ainda, a Figura 29 ((a), (b), (c), (d), (e), para os orifícios de 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1mm e a fenda de 0,5 mm x 30 mm) mostra os espectros tempo-frequência em 3 dimensões para a pressão a $5,9 \times 10^5$ Pa.

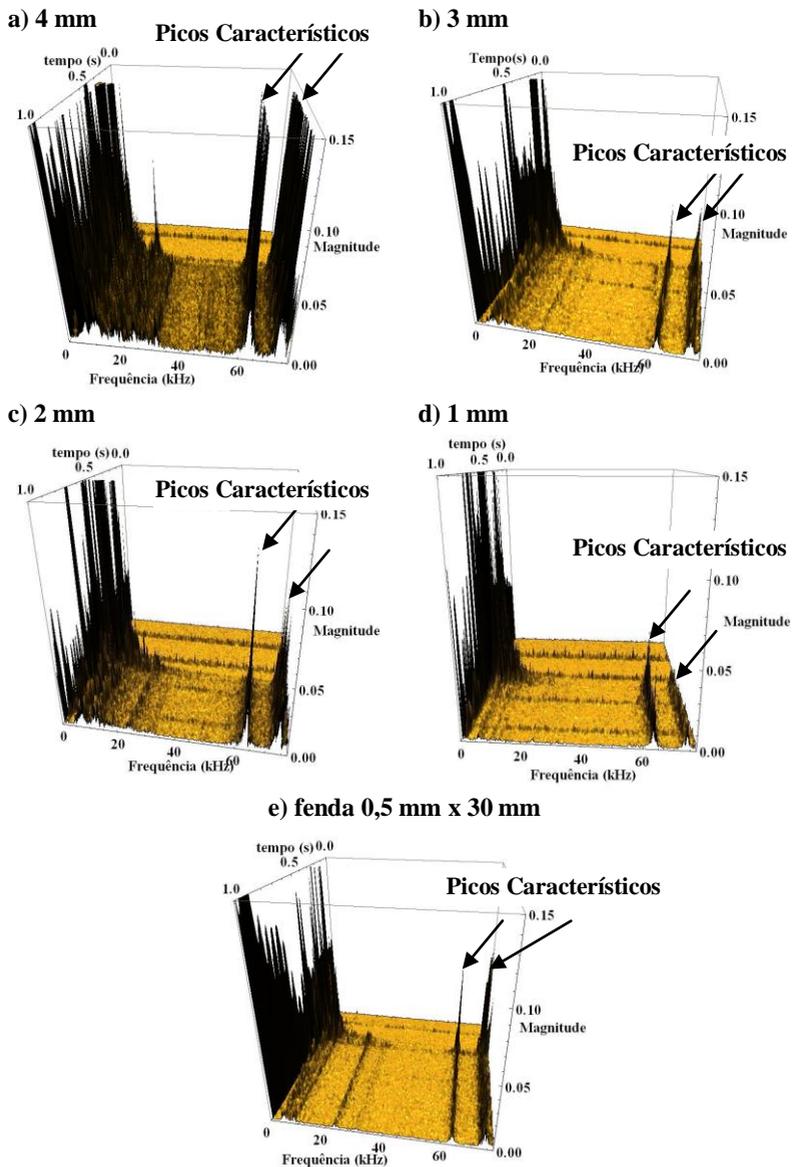


Figura 29: (a), (b), (c), (d), (e) Espectros de tempo/frequência em 3 dimensões para os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $5,9 \times 10^5$ Pa.

Foi possível observar, para todos os casos, que os picos de frequência em 63 e 80 kHz aparecem no espectro de frequências apenas na ocorrência de vazamento. À título de ilustração, a Figura 30 mostra uma vista superior do espectro de tempo/frequência para o orifício de 4 mm mostrado na Figura 29 (a).

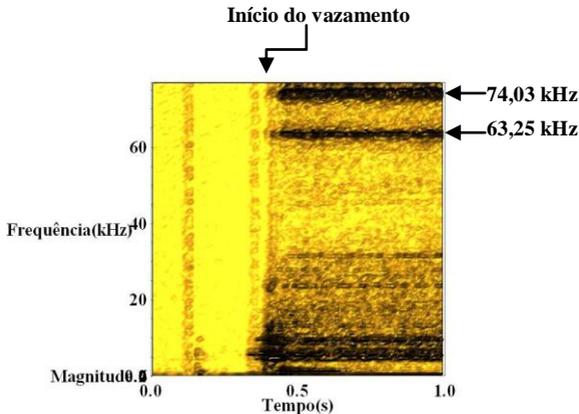


Figura 30: Vista superior do espectro de tempo/frequência do caso apresentado na Figura 27 (a).

Claramente, observa-se que os picos nas frequências de 63 e 80 kHz aparecem no espectro em 0,4 s, ou seja, no instante inicial do vazamento do ar comprimido.

Outra observação importante feita no espectro de tempo/frequência em 3 dimensões é o fato de o sinal ser estacionário, pois não ocorrem mudanças significativas nas frequências com o passar do tempo. Para ilustrar com maiores detalhes, a Figura 31 apresenta um espectro de tempo/frequência em 3 dimensões de um vazamento de ar, utilizando o orifício circular de 4 mm a pressão de $5,9 \times 10^5$ Pa amostrado durante 5 segundos.

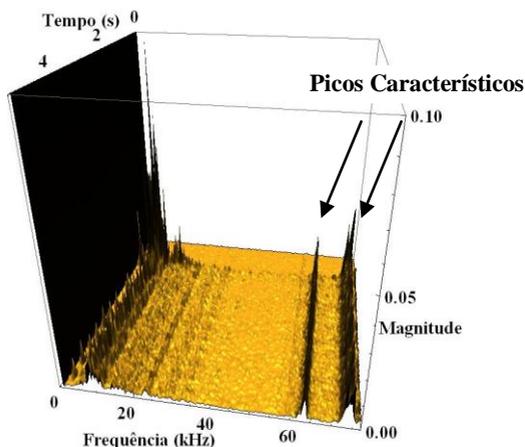
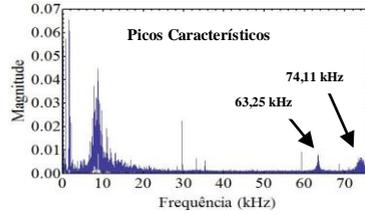
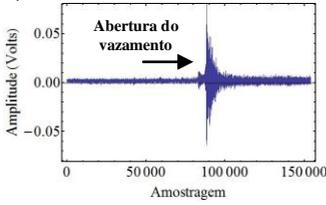


Figura 31: Espectros de tempo - frequência em 3 dimensões para o orifício circular de 4 mm, à pressão de $5,9 \times 10^5$ Pa, durante 5 segundos.

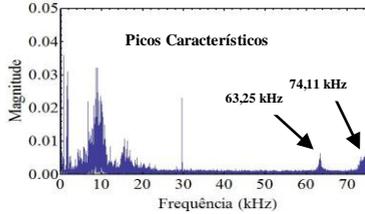
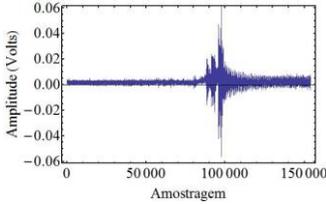
Fica evidente que o sinal de vazamento tem caráter estacionário e que o emprego da TDF para esse caso é adequado e eficaz, pois a mesma se aplica principalmente para esses casos em que o sinal é estacionário. Outro aspecto relevante relacionado ao caráter estacionário do sinal se refere ao fato de não ser necessário o monitoramento contínuo do sistema, pois amostragens realizadas em intervalos de tempo relativamente grandes também seriam eficientes para a detecção de vazamentos.

Para verificar se o emprego da fechadura eletromagnética influenciava significativamente o sinal em estudo, realizaram-se experimentos em que o orifício foi selado com parafina para posterior liberação do vazamento. A Figura 29 mostra os sinais (em Volts) em função da amostragem, utilizando a parafina para vedação, com seus respectivos espectrogramas de frequências para cada um dos orifícios circulares de vazamentos (diâmetros: 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e para a fenda de 0,5 mm x 30 mm.

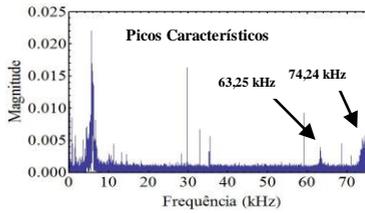
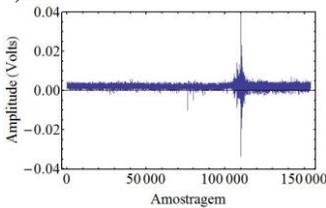
a) 4mm



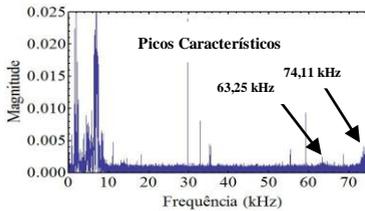
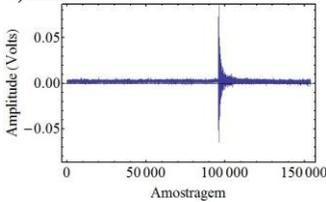
b) 3mm



c) 2mm



d) 1mm



e) fenda

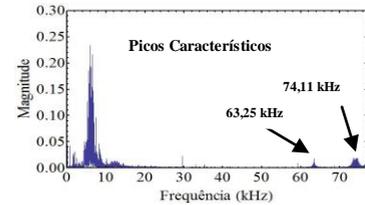
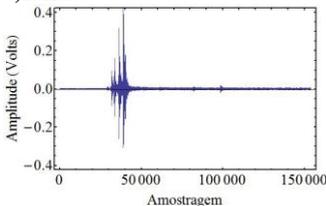


Figura 32: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências para os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2mm, 1mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão inicial de $1,96 \times 10^5$ Pa, com parafina para a vedação.

Novamente, assim que iniciou o vazamento, observou-se um pico no sinal resultante da liberação do vazamento. Da mesma forma, dois picos característicos do espectro foram observados, para todos os orifícios, em 63 e 80 kHz. As Figuras 33 e 34 exemplificam com o caso do furo de 4 mm o espectrograma de frequências utilizando a fechadura eletromagnética e a parafina para liberação do vazamento, ambos à pressão de $1,96 \times 10^5$ Pa. Em todos esses casos, a ocorrência desses picos no espectrograma de frequências levou a especulação de que os mesmos poderiam caracterizar o vazamento.

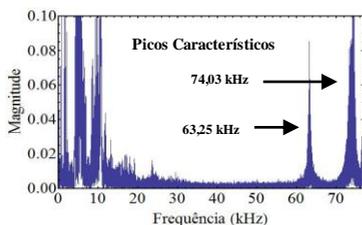


Figura 33: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, para a fechadura eletromagnética, à $1,96 \times 10^5$ Pa.

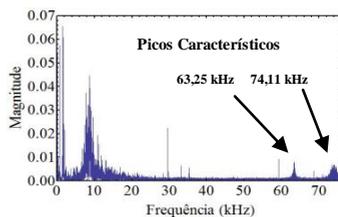
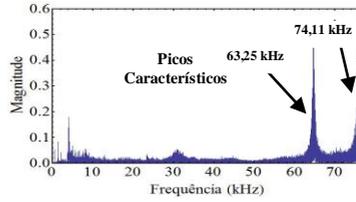
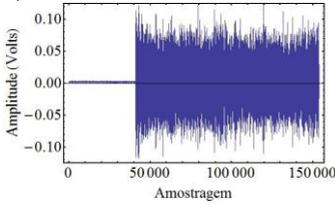


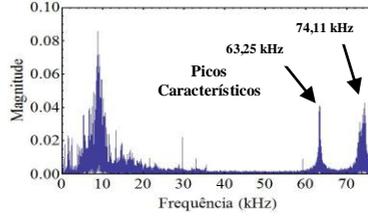
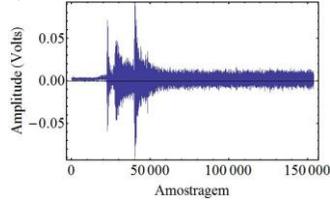
Figura 34: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, para a parafina, à $1,96 \times 10^5$ Pa.

Em seguida, foram estudadas as frequências de vibração, utilizando a parafina como vedação dos orifícios, pressurizando a seção de duto a $5,9 \times 10^5$ Pa. A Figura 35 mostra os sinais (em Volts) em função da amostragem com seus respectivos espectrogramas de frequência de Fourier para cada um dos orifícios circulares de vazamentos (diâmetros: 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e para a fenda de 0,5 mm x 30 mm.

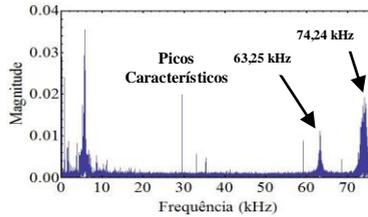
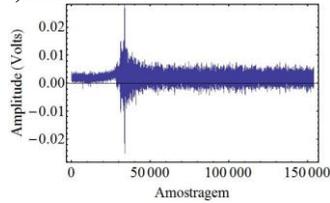
a) 4mm



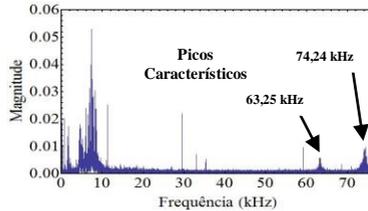
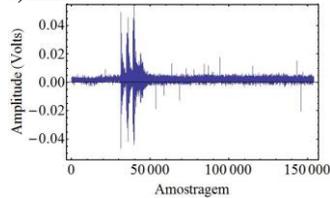
b) 3mm



c) 2mm



d) 1mm



e) fenda

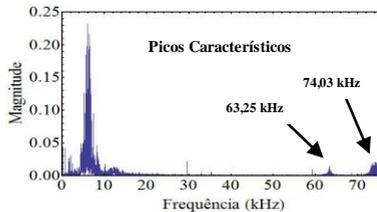
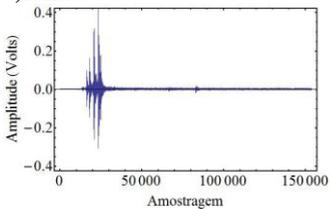


Figura 35: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências para os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2mm, 1mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $5,9 \times 10^5$ Pa, com parafina para a vedação.

Os mesmos dois picos foram observados em 63 e 80 kHz, para todos os orifícios de vazamento testados. Este resultado confirmou que a utilização da fechadura eletromagnética para a liberação do vazamento não exercia nenhuma influência nas frequências de vibração obtidas inicialmente. Desta forma, os experimentos seguintes foram todos realizados utilizando a fechadura eletromagnética devido à maior facilidade que a utilização da mesma gerava na operacionalização dos ensaios.

Certamente, outros eventos geradores de vibrações podem ocorrer nas operações de dutos de petróleo e gás como: fechamento e abertura de válvulas, escoamento dos fluidos ou até mesmo golpes externos desferidos contra os cascos. Desta forma, realizaram-se experimentos iniciais para casos de não vazamento, desferindo golpes no casco da seção de duto em vários pontos. O objetivo era comparar os espectros de frequências para casos de vazamento e não vazamento e confirmar que determinadas frequências, como 63 e 80 kHz não aparecem para casos de não vazamento, sendo possível distinguir claramente uma situação da outra.

Deste modo, o método de detecção seria bastante eficiente e na detecção de um vazamento real o mesmo seria facilmente detectado. A Figura 36 ilustra o sinal e o respectivo espectro de frequências para golpes deferidos contra a seção de duto, através de um instrumento metálico, efetuado nas extremidades e na parte central da lateral onde se encontra o orifício de vazamento.

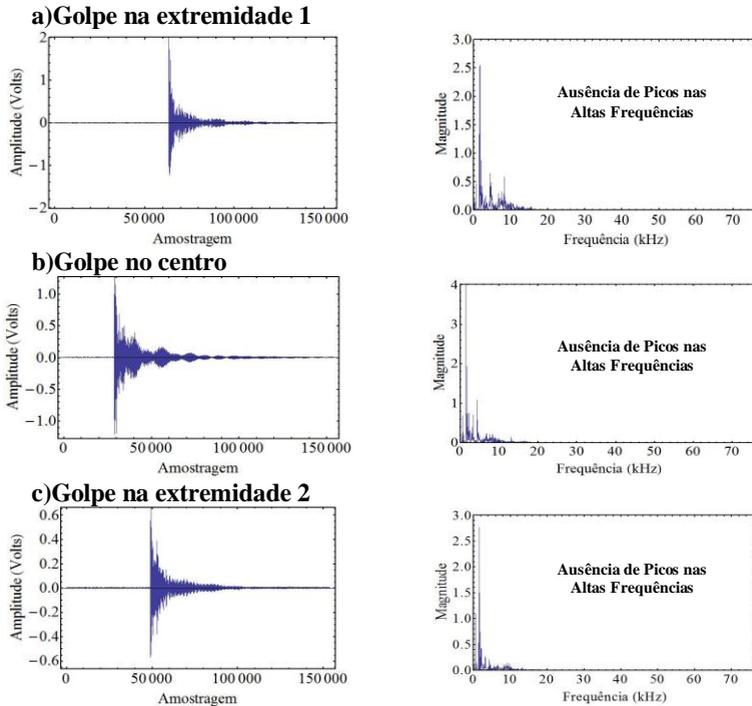


Figura 36: (a) golpe na extremidade, (b) golpe no centro e (c) golpe na extremidade. Todos os golpes foram desferidos no lado onde se encontra o orifício de vazamento.

Observou-se que, desferindo golpes na lateral onde se encontra o orifício de vazamento, os picos de frequências em 63 e 74 kHz não ocorrem para esses casos, sendo que aparecem frequências mais intensas apenas antes de 10 kHz. Exemplificando, as Figuras 37 e 38 apresentam um espectro de frequências resultante de um golpe no centro da seção, onde se encontra o orifício de vazamento, e um espectrograma de um vazamento de ar a $5,9 \times 10^5$ Pa de pressão inicial, utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm.

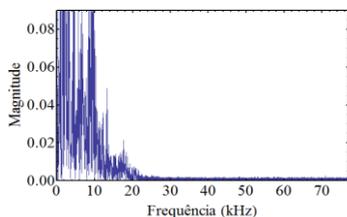


Figura 37: Espectro de frequências de um golpe deferido no centro da seção de duto, onde se encontra o orifício de vazamento.

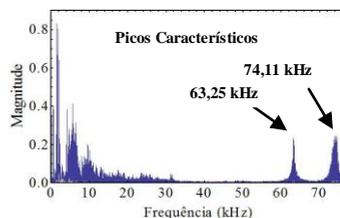


Figura 38: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, pressurizando a seção de duto à $5,9 \times 10^5$ Pa.

Neste contexto, o mesmo resultado pôde ser observado para as batidas deferidas no lado oposto ao orifício de vazamento, como mostra a Figura 39. No decorrer da pesquisa muitas outras situações de não vazamento foram simuladas, como apresentado no capítulo anterior, e os resultados serão discutidos detalhadamente no item 4.4 ainda no decorrer da apresentação e discussão dos resultados.

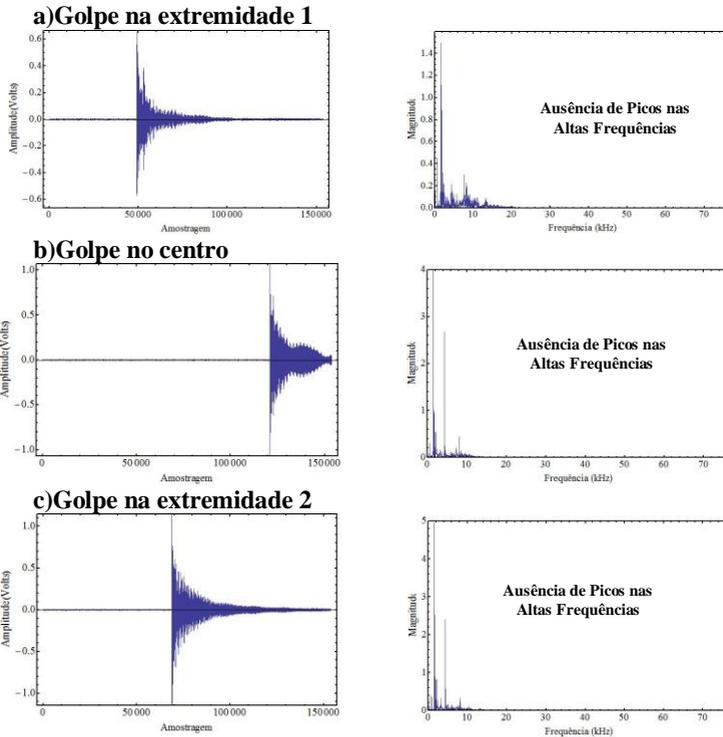


Figura 39: (a) golpe na extremidade 1, (b) golpe no centro e (c) golpe na extremidade. Todos os golpes foram desferidos no lado oposto ao orifício de vazamento.

Em uma etapa seguinte, foram realizados os experimentos variando a posição do acelerômetro piezoelétrico. O acelerômetro foi fixado nos chanfros 1, 3, 4, e 5 (Figuras 22 e 23) e os resultados são apresentados nos APÊNDICES A, B, C e D, respectivamente. Os resultados obtidos variando-se as posições do acelerômetro são os mesmos obtidos com a fixação do acelerômetro no chanfro 2, ou seja, aparecem os picos característicos de frequências em 63 e 80 kHz para o posicionamento do sensor em todos os outros chanfros disponíveis.

Entretanto, observou-se, que quanto maior a proximidade do sensor (chanfros 1 e 2) ao orifício de vazamento, maior foi a intensidade do sinal, ocorrendo uma atenuação do mesmo quando a fixação do sensor foi feita a uma distância maior do orifício de vazamento (chanfros 3, 4 e 5).

Analisou-se o espectro de frequências obtido para o ensaio de vazamento de ar comprimido com a seção de duto parcialmente preenchida com 6 litros de água líquida. A Figura 40 apresenta o sinal (em Volts) e o respectivo espectro de frequências.

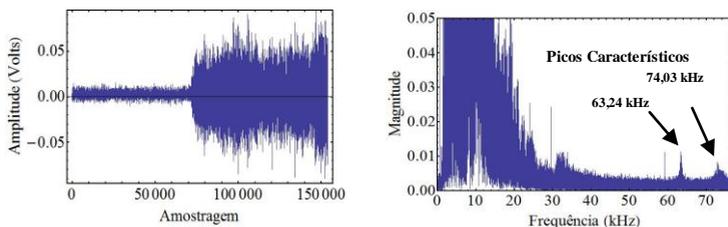


Figura 40: Sinal em Volts e respectivo espectro de frequência para o orifício circular (4 mm), com pressurização de $5,9 \times 10^5$ Pa, preenchendo-se parcialmente a seção de duto com 6 litros de água líquida.

O resultado obtido demonstrou que mesmo com o sistema modificado pela presença da água líquida, as frequências características de vibração para vazamentos de ar comprimido permaneceram as mesmas, garantindo a identificação desses vazamentos. Ou seja, mesmo com a redução do volume útil para o ar comprimido na seção de duto e presença de água líquida em contato direto com praticamente metade da área interna da parede metálica do duto, as frequências de vibração, próprias do vazamento de ar comprimido, não se alteraram.

Esse resultado é muito interessante, pois aponta para uma grande robustez do método de identificação do vazamento, na medida em que o mesmo parece ser pouco sensível a alterações na estrutura do sistema e nas condições operacionais. De fato, observou-se que, mantido o tipo de fluido, modificações nas dimensões e geometria do furo de vazamento, bem como no valor da pressão aplicada, não produziram alterações sensíveis nos valores de frequências características de vazamento do fluido em questão.

Finalmente, procurou-se verificar se a espessura ou a geometria das placas perfuradas poderiam alterar as frequências características de vibração que estavam aparecendo no espectro. Para isso, realizou-se um experimento onde o vazamento ocorreu pela própria válvula de admissão do ar na seção de duto. A Figura 41 apresenta o sinal (em Volts) e o respectivo espectrograma de frequências obtido.

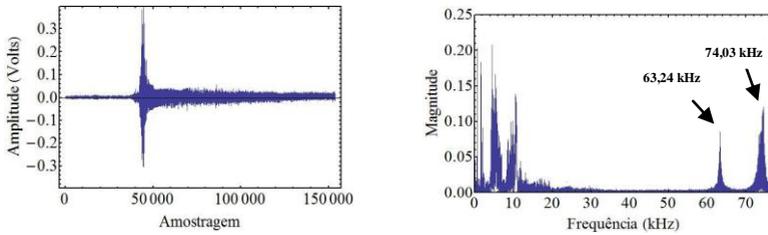


Figura 41: Sinal em Volts e respectivo espectro de frequência para o vazamento pela entrada de ar, com pressurização de $1,96 \times 10^5$ Pa.

Esse resultado indica que as frequências de 63 e 80 kHz detectadas estão relacionadas ao fenômeno de despressurização acompanhada de um jato, e são pouco ou nada dependentes dos aspectos geométricos do furo, já que a válvula de admissão do ar, por onde se deu esse teste de vazamento, apresenta forma e posicionamento totalmente diferentes das placas perfuradas utilizadas nos demais testes.

Os resultados com ar comprimido como fluido de vazamento mostraram-se bastante promissores para a detecção de vazamentos em dutos. Assim, buscando ampliar o campo de aplicação da metodologia proposta, estudou-se também o comportamento vibracional de seção de duto para fluidos mais viscosos como a água, por exemplo. Desta forma, foram realizados ensaios de vazamentos utilizando água e óleo de soja como fluidos de vazamento.

4.3 Vazamentos de água

O objetivo dos novos ensaios foi estudar o espectro de frequências de vibração gerado pelo vazamento de água e compará-lo com o do vazamento de ar comprimido e ensaios de não vazamento com a seção de duto completamente preenchida com água.

Para os ensaios com água, encheu-se completamente a seção de duto com água, que foi pressurizada a $9,8 \times 10^5$ Pa com o auxílio de uma mangueira com ar comprimido. A fechadura eletromagnética também foi utilizada nesses ensaios para a liberação do vazamento.

A Figura 42 apresenta os sinais (em Volts) em função da amostragem. O sinal mostra 1s de vazamento de água, logo após a liberação da fechadura eletromagnética. Juntamente são mostrados os respectivos espectrogramas de frequências (TDF) para cada um dos orifícios circulares de vazamentos (diâmetros: 4 mm, 3 mm, 2 mm e 1 mm) e a fenda de 0,5 mm x 30 mm.

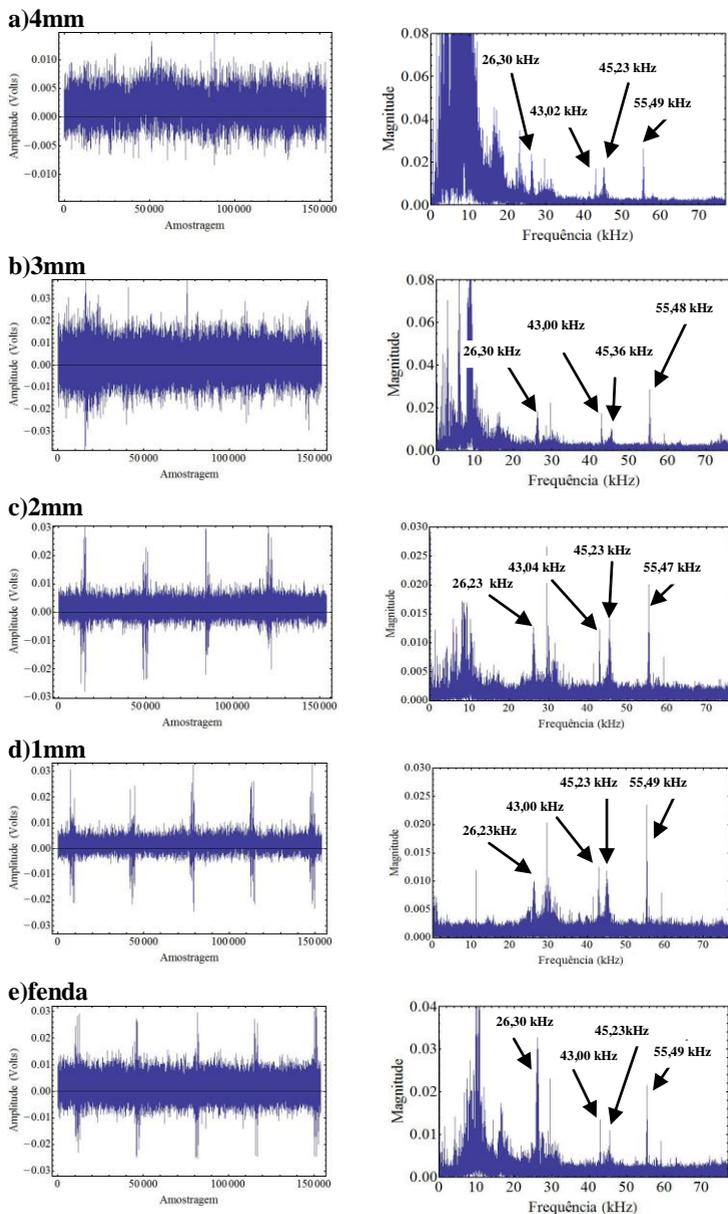


Figura 42: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências utilizando os orifícios circulares (4 mm,3 mm, 2mm, 1mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $9,8 \times 10^5$ Pa.

Para todos os furos utilizados nos ensaios de vazamento de água, as frequências de 26, 43, 45 e 55 kHz sempre apareceram no espectro. As frequências que aparecem ao redor de 30 kHz não foram consideradas por não se mostrarem características do vazamento; em alguns ensaios de não vazamento, as mesmas apareceram possivelmente como resultado de ruídos do sistema de aquisição. Como poderá ser notado mais adiante, também para os ensaios com óleo, as frequências próximas de 30 kHz igualmente não foram consideradas pelo mesmo motivo.

Verificou-se também, como já ocorria para os experimentos utilizando ar comprimido, que para os orifícios circulares, quanto maior o diâmetro, maior é a intensidade dos sinais (em Volts).

Assim, os resultados mostraram diferenças entre os espectros de frequência de vibração para os ensaios utilizando ar comprimido ou água. As Figuras 43 e 44 mostram dois espectros de frequências, ambos utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, para um vazamento de água e para um de ar comprimido, respectivamente.

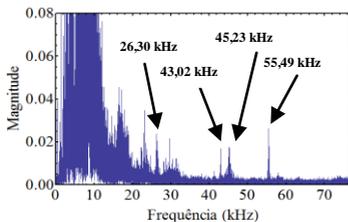


Figura 43: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, com água, pressurizando a seção de duto à $9,8 \times 10^5$ Pa.

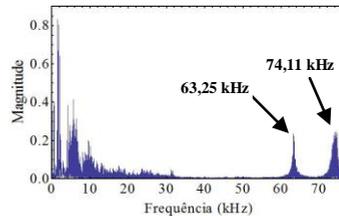


Figura 44: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, pressurizando a seção de duto à $5,9 \times 10^5$ Pa.

As frequências de vibração em 63 e 80 kHz não apareceram para os ensaios de vazamento de água apresentando frequências bem específicas e distintas daquelas encontradas para situações de não vazamento. Exemplificando, as Figuras 45 e 46 mostram dois espectros de frequências, ambos com o orifício circular de diâmetro 4 mm, para um vazamento de água e para uma situação de não vazamento para a seção de duto pressurizada e preenchida completamente com água, submetida ainda a movimentos pendulares na direção axial, respectivamente.

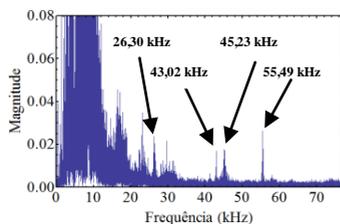


Figura 45: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, com água, pressurizando a seção de duto à $9,8 \times 10^5$ Pa.

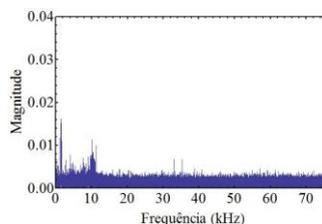


Figura 46: Espectro de frequências da seção de duto preenchida completamente com água e aplicação de movimentos pendulares na direção axial.

Claramente, observa-se que os espectros de frequências são distintos e possibilitam a identificação do vazamento. Como pode ser comprovado, nenhuma das frequências observadas no vazamento de água (26, 43, 45 e 55 kHz) aparece no espectro de frequências para a situação de não vazamento com o duto pressurizado cheio de água.

Estes resultados mostram que a técnica é promissora para a detecção de vazamentos, com possibilidade de identificação do fluido de vazamento e a distinção entre situações de vazamento e de operação nos dutos em ausência de vazamento.

4.4 Vazamentos de óleo de soja

Por último, foram determinadas as frequências de vibração enchendo-se completamente a seção de duto com óleo de soja, que foi pressurizado a $9,8 \times 10^5$ Pa com o auxílio de ar comprimido. A fechadura eletromagnética uma vez mais foi utilizada para a liberação do vazamento.

A Figura 47 mostra os sinais (em Volts) em função da amostragem. O sinal mostra 1s de vazamento de óleo de soja, logo após a liberação da fechadura eletromagnética. Também são mostrados espectrogramas de frequências (TDF) para cada um dos orifícios circulares de vazamentos (diâmetros: 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda de 0,5 mm x 30 mm.

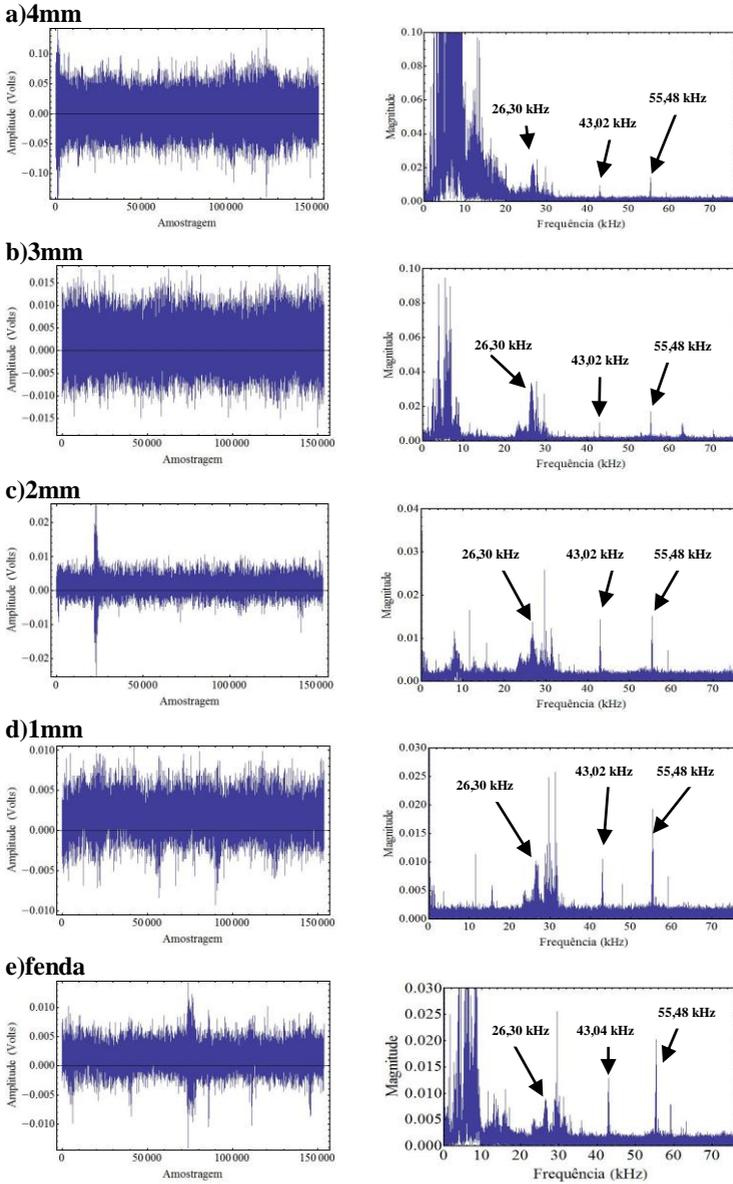


Figura 47: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências para os orifícios circulares (4 mm,3 mm, 2mm, 1mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $9,8 \times 10^5$ Pa.

Observou-se que nos vazamentos, com óleo de soja e para os diferentes furos, três picos característicos sempre foram observados em 26, 43 e 55 kHz. Para os orifícios circulares, como já verificado para os casos utilizando ar comprimido e água, constatou-se que a magnitude do sinal diminuía com a redução do diâmetro do orifício. Além disto, as mesmas frequências de vibração ocorreram independentemente do tamanho ou forma do furo de vazamento, como também já havia sido observado nos casos anteriores.

Os resultados mostraram clara diferença entre os espectros de frequências para os ensaios com óleo de soja ou ar comprimido.

As Figuras 48 e 49 mostram dois espectros de frequências, ambos utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, para um vazamento de óleo e para a seção de duto, em repouso, completamente preenchida com óleo, mas sem ocorrer o vazamento, respectivamente.

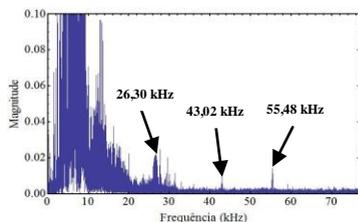


Figura 48: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, com óleo, pressurizando a seção de duto a $9,8 \times 10^5$ Pa.

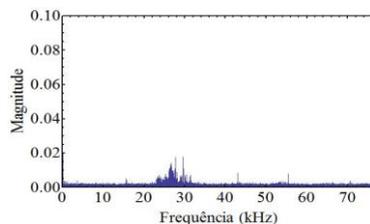


Figura 49: Espectro de frequências em ausência de vazamento com o duto cheio de óleo, pressurizando a $9,8 \times 10^5$ Pa.

O aparecimento de picos na faixa de 23 a 31 kHz na ausência de vazamento (Figura 49) parece indicar que tais frequências se manifestaram devido a ruídos do sistema de aquisição e/ou deficiência no posicionamento do acelerômetro que teria levado à captação de vibrações do ambiente de teste. De qualquer forma, como mencionado anteriormente no item 4.3, as frequências próximas de 30 kHz não foram consideradas como características de vazamento.

As frequências de vibração em 63 e 80 kHz também não apareceram para os ensaios de vazamento com óleo, que apresentaram frequências diferentes bem específicas, como já discutido.

Por outro lado, quando comparados os espectros de frequências para vazamentos de óleo e de água semelhanças puderam ser observadas. As Figuras 50 e 51 apresentam dois espectros de

freqüências, ambos utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, para um vazamento de óleo e para um de água.

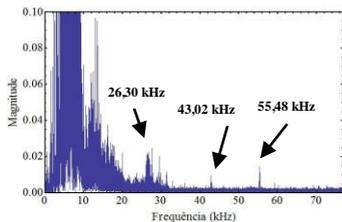


Figura 50: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, com óleo, pressurizando a seção de duto à $9,8 \times 10^5$ Pa.

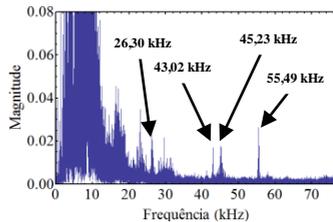


Figura 51: Espectro de frequências utilizando o orifício circular de diâmetro 4 mm, com água, pressurizando a seção de duto à $9,8 \times 10^5$ Pa.

Três frequências de vibração coincidentes apareceram para os casos de água e óleo. As frequências de 26, 43 e 55 kHz foram observadas em ambos os casos, mostrando existir uma similaridade nas vibrações produzidas pelo vazamento desses dois fluidos; com a presença da frequência adicional de 45 kHz, para o caso da água.

Com os resultados obtidos, pôde-se concluir que com líquidos (fluidos mais densos e mais viscosos que o ar), as frequências características de vibração produzidas no casco do duto foram diferentes e menores do que aquelas apresentadas com a utilização de ar comprimido.

Com não era possível garantir se a taxa de amostragem era suficiente ou ocorria *aliasing* (“rebatimento”) com essas frequências obtidas, foram realizados ensaios de vazamento de óleo de soja, com o orifício de vazamento de 4 mm a pressão de $5,9 \times 10^5$ Pa, variando-se a taxa de amostragem em 150,3 kHz; 133,3 kHz; 111,1 kHz; 90,9 kHz. A seção de duto foi pressurizada, os vazamentos foram liberados através da fechadura eletromagnética e o tempo de aquisição de dados foi de um segundo.

Na Figura 52 são apresentados os sinais e seus respectivos espectros de frequências para cada uma das amostragens testadas.

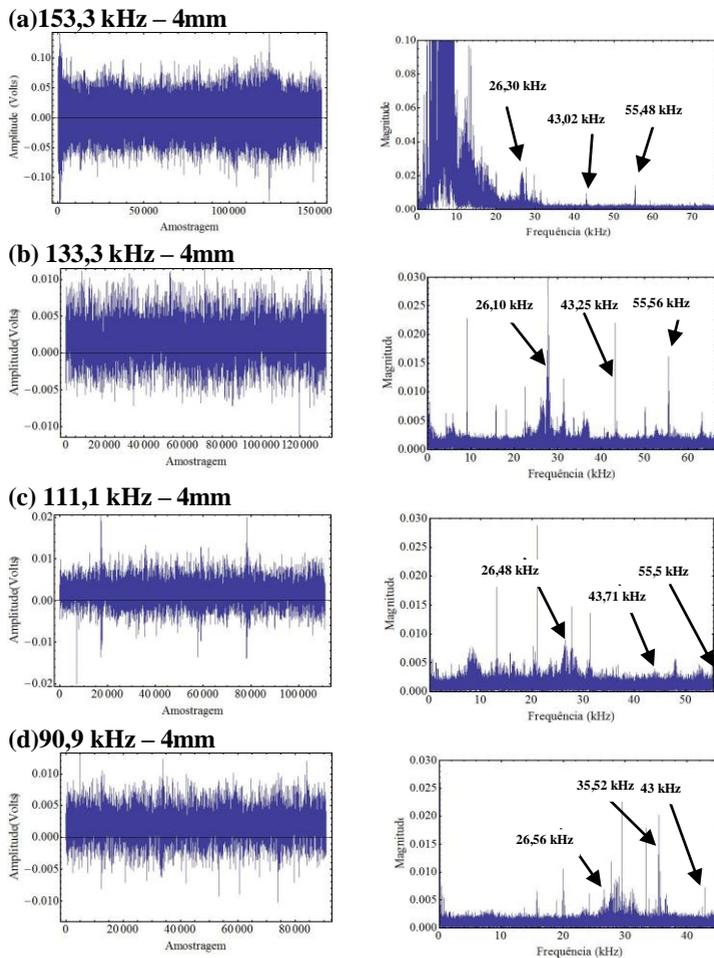


Figura 52: (a), (b), (c) Sinal em Volts e respectivo espectro de frequências de Fourier com taxa de amostragem 150, 130, 110 e 90 kHz, respectivamente.

Concluiu-se que não ocorria “rebatimento” de nenhuma das frequências de vibração obtidas, pois se observou que mesmo diminuindo a amostragem, as frequências continuaram aparecendo no mesmo lugar, ocorrendo modificação das mesmas apenas quando a taxa de amostragem já era insuficiente, como pode ser observado na Figura 52 (c), onde a frequência de 55 kHz já aparece no final do espectro. Ainda, na Figura 52 (d) observa-se claramente que a frequência de 35,52

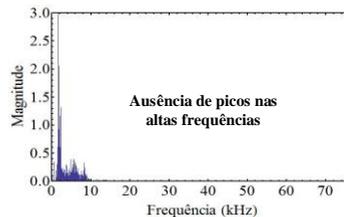
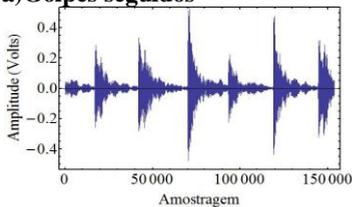
kHz é um “rebatimento” da frequência de 55 kHz que ocorre devido à insuficiência da taxa de amostragem em representar o sinal.

Os mesmos ensaios, variando-se a taxa de amostragem foram realizados para os vazamentos com água e verificou-se que, assim como nos vazamentos de óleo, não ocorria “rebatimento” de nenhuma das frequências de vibração.

4.5 Eventos de não vazamento

No decorrer da realização dos ensaios de vazamentos foram realizados, concomitantemente, ensaios envolvendo eventos de não vazamento. No item 4.2 foram apresentados espectrogramas de frequências obtidas para golpes em diferentes pontos da seção de duto. Neste item serão apresentados e discutidos resultados de diferentes ensaios de não vazamento. Inicialmente, após os ensaios com um único golpe no casco da seção de duto, foi realizado um teste em que a seção era submetida a seguidos golpes no lado externo e um golpe no interior da seção de duto. A aquisição era realizada para 1 s de dados. A Figura 53 (a) mostra o sinal (Volts) e o espectro de frequências para os golpes seguidos e a Figura 53 (b) apresenta os mesmos dados, mas para a batida na área interna da seção de duto.

a) Golpes seguidos



b) Golpe interno

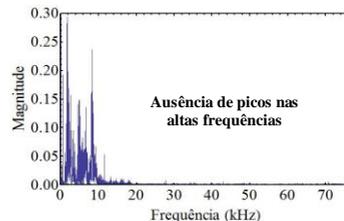
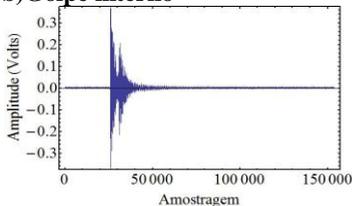


Figura 53: (a), (b) Sinais (em Volts) em função da amostragem e respectivo espectrograma de frequências para golpes seguidos na lateral externa e um golpe no interior da seção de duto, respectivamente.

O resultado mostra que para todos os testes de golpes desferidos, tanto externa quanto internamente na seção de duto, não ocorreram picos nas altas frequências. Portanto, nos resultados fica clara a distinção de frequências de vibração em caso de vazamento e evento de não vazamento.

Além disso, foram realizados outros dois experimentos. No primeiro, o duto era pressurizado e fazia-se a aquisição de dados. No segundo realizava-se uma aquisição de dados do ruído do ambiente onde se encontrava a seção de duto. A Figura 54 (a) apresenta o sinal (Volts) e o espectrograma de frequências para a pressurização da seção e a Figura 54 (b) mostra o sinal (Volts) e o espectrograma de frequências para os dados de ruídos do ambiente.

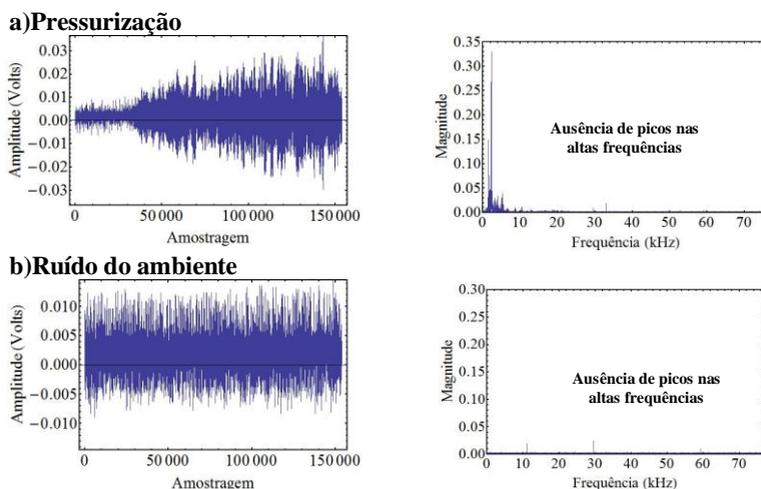


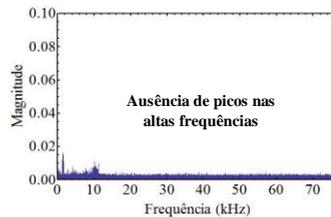
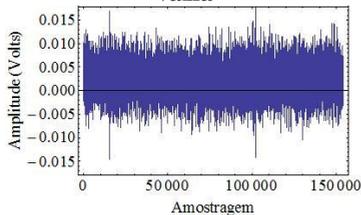
Figura 54: (a), (b) Sinais (em Volts) em função da amostragem e respectivo espectrograma de frequências para a pressurização da seção de duto e o ruído no ambiente onde a seção de duto se encontrava, respectivamente.

Novamente, os dois eventos registrados não mostraram altas frequências de vibração no casco da seção de duto, possuindo um espectrograma de frequências bastante distinto dos obtidos para ensaios de vazamento. Para o caso de pressurização, ocorrem frequências de vibração abaixo de 10 kHz e para o ruído do ambiente obtiveram-se apenas alguns picos de frequência que se destacaram em 10 kHz e 30 kHz.

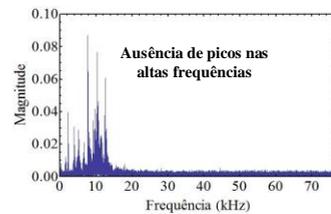
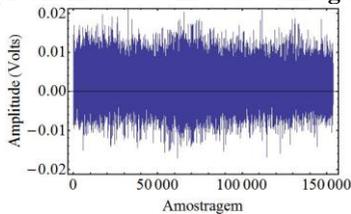
Também foram realizados mais dois experimentos em que a seção de duto era submetida a movimentos pendulares na direção axial e

realizava-se a aquisição de dados. O primeiro ensaio consistiu em realizar oscilações sob a seção de duto vazia, ou seja, sem nenhum fluido e no segundo ensaio a seção foi preenchida completamente com água e os movimentos pendulares foram aplicados. A Figura 55 (a) apresenta o sinal (Volts) e o espectrograma de frequências para a aplicação da oscilação com a seção de duto vazia e a Figura 55 (b) mostra o sinal (Volts) e o espectrograma de frequências para a aplicação das oscilações com a seção completamente preenchida com água.

a) Movimento pendular da seção vazia



b) Movimento pendular da seção preenchida até a metade com água



c) Movimento pendular da seção preenchida completamente com água

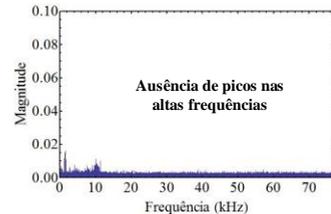
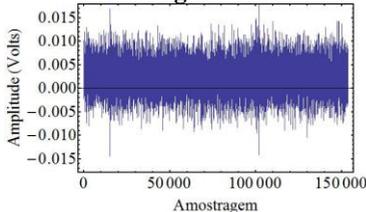


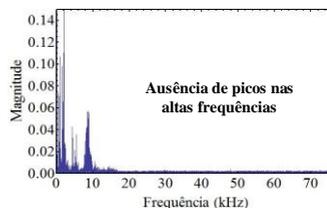
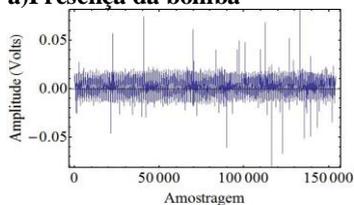
Figura 55: (a), (b) e (c) Sinais (em Volts) em função da amostragem e respectivo espectrograma de frequências para a aplicação de movimentos pendulares na direção axial sobre a seção de duto vazia, preenchida até a metade e preenchida completamente com água, respectivamente.

As frequências de vibração encontradas foram as mesmas para os casos em que a seção estava vazia e completamente cheia, ou seja, não houve diferença no espectro, preenchendo-se a seção com água e novamente as altas frequências não ocorreram para esses ensaios.

Para o experimento com a seção de duto preenchida até a metade com água obteve-se uma magnitude maior do sinal justificada pelo escoamento da água dentro da seção, sendo que mesmo assim os picos de frequência de vibração obtidas não ultrapassaram 15 kHz.

Por último, foram realizados dois experimentos simulando a presença de fontes de vibração como uma pequena bomba de sucção a vácuo e um agitador de peneiras para separação de sólidos por vibração descrito anteriormente. Para os dois casos, a bomba de sucção descrita anteriormente e, posteriormente, o agitador foram colocados já em funcionamento em contato com a seção de duto, e a aquisição de dados foi realizada. A Figura 56 (a) apresenta o sinal e o espectrograma de frequências com a presença da bomba e a Figura 56 (b) mostra o sinal e o espectrograma de frequências com a presença do agitador.

a) Presença da bomba



b) Presença do agitador

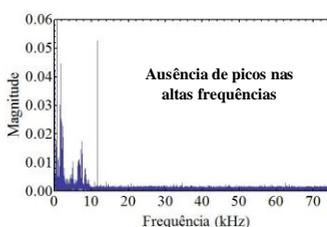
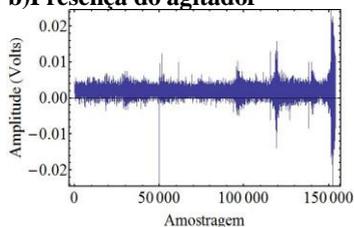


Figura 56: (a), (b) Sinais (em Volts) em função da amostragem e respectivo espectrograma de frequências na presença de uma bomba e um agitador em contato com a seção de duto, respectivamente.

Para estes últimos testes obteve-se, como já esperado, um espectro de frequências parecido com os obtidos para todos os outros eventos de não vazamento, ou seja, com ausência de picos em altas frequências.

4.6 Desempenhos das Redes Neurais Artificiais

Foram realizados treinamentos utilizando diferentes números de dados de entrada (10, 20 e 30 dados). Entretanto, as redes treinadas e validadas utilizando 40 dados foram as que apresentaram melhores resultados em comparação com as que apresentavam menores números de dados.

Inicialmente serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para o treinamento e validação da RNA utilizando os 40 dados igualmente espaçados dentro de todo o espectro de frequências.

Vários testes foram realizados considerando RNA's com diferentes números de camadas e de neurônios na camada intermediária. A rede neural desenvolvida, considerando os 40 dados igualmente espaçados dentro do espectro de frequências, que apresentou menor erro e melhor desempenho assegurando rápido treinamento e evitando o excesso de parametrização foi de quatro camadas, sendo uma camada de entrada (40 entradas) e 2 camadas intermediárias (ou camadas ocultas) com 20 neurônios em cada e uma camada de saída (1 saída). A arquitetura da rede é ilustrada na Figura 57.

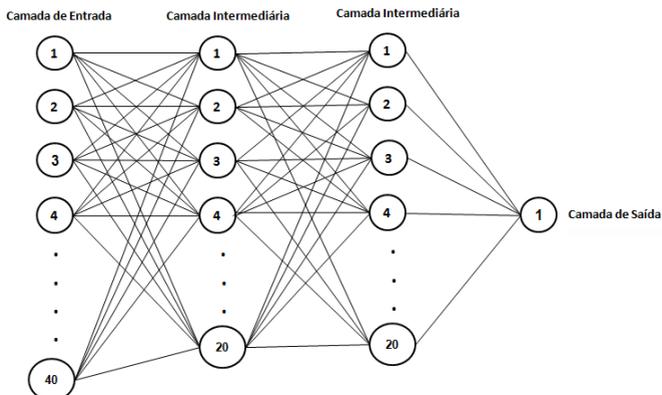


Figura 57: Arquitetura da RNA com 40 dados de entrada.

O desempenho da função do erro médio quadrático em função do número de iterações durante a fase de aprendizagem é apresentado na Figura 58. A rede convergiu para a meta da função pretendida após 22 iterações. O erro médio quadrático foi $5,6 \cdot 10^{-15}$, ou seja, um valor muito satisfatório de erro para a referida RNA.

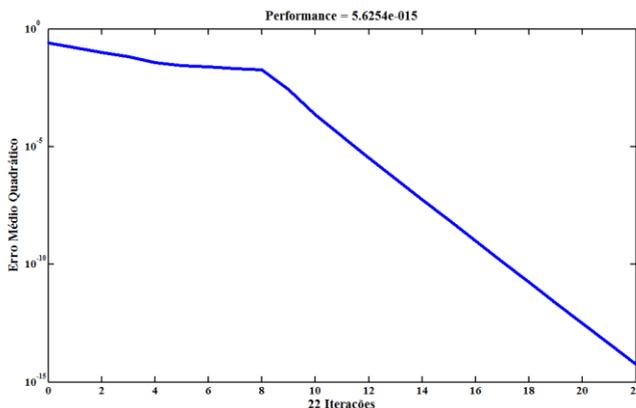


Figura 58: Erro médio quadrático em função do número de iterações.

A Tabela 6 mostra o resultado obtido com a melhor arquitetura determinada para este caso.

Tabela 6: Resultado obtido para a rede neural treinada.

Arquitetura/Época	% Sucesso de previsão com vazamento	% Sucesso de previsão sem vazamento
40:20:20:1/22	100	98

A RNA detectou 100% dos casos de vazamento e 98% dos casos de não vazamento. Os resultados obtidos mostraram-se bastante satisfatórios, pois o baixo percentual de erros para os casos de não vazamento diminui a possibilidade de alarmes falsos muito comuns nos principais métodos de detecção de vazamentos utilizados atualmente. Além disso, a RNA foi treinada e validada para os diferentes orifícios de vazamento utilizados sendo que a mesma detectou o vazamento mesmo para o menor diâmetro de orifício circular de 1mm.

Posteriormente, realizou-se o treinamento e validação de uma RNA variando os dados de entrada para testar se utilizando outros dados de entrada (40 maiores valores de magnitude da TDF), o desempenho da RNA seria tão satisfatório quanto o obtido anteriormente.

A rede neural desenvolvida, considerando os 40 maiores valores de magnitude do espectro de frequência, que apresentou menor erro e melhor desempenho, assegurando rápido treinamento e evitando o excesso de parametrização foi de quatro camadas, sendo uma camada de

entrada (40 entradas) e 2 camadas intermediárias com 40 neurônios na segunda camada e 21 na terceira, além de uma camada de saída (1 saída). A arquitetura da rede é ilustrada na Figura 59.

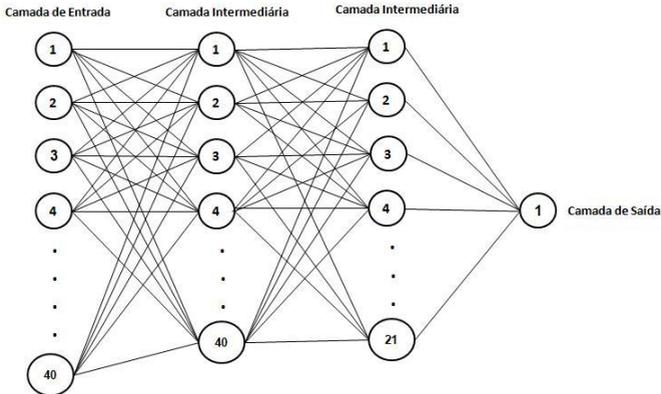


Figura 59: Arquitetura da RNA com 30 dados de entrada.

Para este caso, a rede convergiu para a meta da função pretendida após 21 iterações (Figura 60). O erro médio quadrático foi $1,2 \cdot 10^{-15}$, sendo também um valor muito satisfatório de erro para essa RNA.

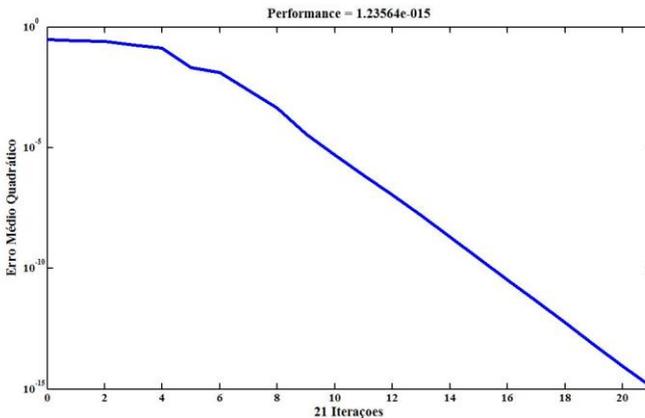


Figura 60: Erro médio quadrático em função do número de iterações.

A Tabela 7 mostra o resultado obtido com a melhor arquitetura determinada para este caso.

Tabela 7: Resultado obtido para a rede neural treinada.

Arquitetura/Época	% Sucesso de previsão com vazamento	% Sucesso de previsão sem vazamento
40:40:21:1/21	97	97

A RNA detectou 97% dos casos de vazamento e 97% dos casos de não vazamento. Os resultados obtidos são aceitáveis, pois o percentual de erros é baixo tanto para o caso de vazamento quanto de não vazamento. Comparativamente, a arquitetura inicial apresentou menores percentuais de erros como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8: Comparação do percentual de insucesso de previsão das redes neurais treinadas e validadas.

Arquitetura/Iterações	% Insucesso de previsão com vazamento	% Insucesso de previsão sem vazamento
40:20:20:1/22	0	2
40:40:21:1/21	3	3

Os dois modelos de RNA foram considerados adequados para detecção de eventos de vazamentos e de não vazamentos, pois os erros são aceitáveis, dando confiabilidade às redes neurais desenvolvidas.

Outra vantagem importante destas redes neurais desenvolvidas é que as mesmas são capazes de detectar as situações de não vazamento, pois elas não dão apenas informações de ocorrência de vazamento, mas também que determinados sinais são resultado de golpes no casco da seção do duto, ruídos do ambiente ou pressurização da seção de duto. Em muitos casos apresentados na literatura, em que se utilizam RNA para detecção de vazamentos, o tipo de abordagem tratada neste trabalho não é adotada e os resultados apresentados pelas RNA's geram muitos alarmes falsos de vazamento.

Concluindo, os resultados obtidos trazem perspectivas futuras de aplicação bastante promissoras para uma técnica eficaz de detecção de vazamentos em dutos de petróleo e gás, sendo possível uma redução de prejuízos econômicos e ambientais para a indústria.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões acerca do trabalho desenvolvido e algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros através da mesma abordagem aqui apresentada.

5.1 Conclusões

As necessidades de reduzir custos e perdas aliadas às exigências de leis ambientais têm levado a indústria do petróleo a buscar soluções eficientes na manutenção de seus dutos. Desta forma, nos últimos anos, a detecção de vazamentos em redes de tubulações tem reduzido significativamente os impactos ambientais, já que sua atuação é instantânea, reduzindo o tempo de resposta, comparado ao da intervenção humana.

Para os experimentos realizados utilizando ar comprimido, água ou óleo como fluido de vazamento foi possível identificar frequências de vibração específicas em cada caso estudado, distinguindo-se, desta forma, a ocorrência de vazamento dos eventos de não vazamento.

Verificou-se que os sinais de vazamento têm caráter estacionário e que o emprego da Transformada Discreta de Fourier (TDF) para esse estudo é adequado e eficaz, pois a mesma se aplica principalmente para casos em que o sinal é estacionário. Outro aspecto muito importante relacionado ao caráter estacionário do sinal, se refere ao fato de não ser necessário o monitoramento contínuo do sistema, pois amostragens realizadas em intervalos de tempo relativamente grandes também seriam eficientes para a detecção de vazamentos.

Constatou-se, também, que para os ensaios de vazamento, tanto utilizando fechadura eletromagnética quanto parafina para selar o orifício, picos característicos da despressurização foram observados no espectro de frequência obtido por TDF aplicada no sinal gerado.

Um resultado bastante relevante para o estudo realizado, é que foi possível identificar os vazamentos independentemente do tamanho ou geometria do orifício de vazamento utilizado ou da pressão aplicada, evidenciando a robustez do método e boas perspectivas para a identificação segura e eficiente de vazamentos da indústria de petróleo e gás. Mesmo promovendo alterações estruturais na seção de duto (preenchendo-a parcialmente com água líquida), foi possível identificar o vazamento de ar, sendo mantidas as frequências características de vibração que parecem ser geradas de maneira específica pela passagem do jato do fluido em questão através do furo de vazamento.

Em todas as condições de operação aplicadas observou-se que quanto maior a pressão utilizada maiores foram as magnitudes (intensidades) dos sinais obtidos, ou seja, maior é a vibração causada no casco da seção de duto.

A mudança de posição do sensor nos chanfros não limitou a identificação dos vazamentos, mostrando que mesmo o sensor estando do lado oposto ao orifício de vazamento foi possível detectá-lo eficientemente, pois as frequências de vibração não se alteram.

Os resultados obtidos com a RNA, utilizando os sinais provenientes do acelerômetro piezoelétrico para treinamento e validação, mostraram-se adequados para o desenvolvimento e a otimização da técnica de detecção aqui utilizada.

Desta forma, o método aqui denominado vibroacústico se mostra bastante promissor e robusto para a detecção de vazamentos em dutos, sendo relevante a aplicação deste método experimental em escalas reais de redes de dutos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos que poderão ser realizados futuramente baseando-se na técnica de detecção de vazamentos pelo método vibroacústico sugere-se:

- aplicar a técnica aqui apresentada, mas empregando outros sensores de aceleração disponíveis no mercado. Existem disponíveis sensores que medem as acelerações em faixas maiores de frequência;
- aplicar a técnica de detecção de vazamentos em campos de redes de tubulação de petróleo e gás utilizando o transdutor de aceleração para compará-las com os experimentos realizados em laboratório e verificar a eficiência do método;
- realizar testes de atenuação do sinal ao longo do duto para estudar a demanda em número de sensores necessários para a detecção eficaz de vazamentos. Para isso, faz-se necessária a utilização de seções de dutos com comprimentos maiores que o utilizado neste trabalho.
- desenvolver, com a técnica vibroacústica, uma metodologia que, além de permitir a detecção do vazamento, possibilite a localização do mesmo.

6. REFERÊNCIAS

- ALDRED, John. *Manual of Sound Recording*. London: Fountain Press, 1972
- BAE, H. C. von Baeyr, *Catch the Wave (PHYSICA)*, The Sciences, May/June, 1999, pg. 10-13.
- BELSITO, S., LOMBARDI, P., ANDREUSSI, P., BANERJEE, S. *Leak detection in liquefied gas pipeline by artificial neural networks*. AICHE Journal, v.44, n.12, p.2675-2688, 1998.
- BLACK, P. *A review of pipeline leak detection technology. Pipeline System, V.7, Fluid Mechanics and its application, Dordrecht. Kluwer Academic Publishers. p.287-298, 1992.*
- BRUEL & KAJER. *Vibration and Signal Conditioning. Sound and Vibration Measurement A/S.* , booklet, april. 1988, 32 p.
- EMBREE, P. M.; KIMBLE, B. *C language algorithms for digital signal processing*. Prentice-Hall, USA, 1991.
- HAGAN, M. T., DEMUTH, H.B., BEALE, M. *Neural Network Design, 7th International Student Edition*. Vikas Publishing House, 2003.
- HAYKIN, S. *Redes neurais: princípios e prática*. 2.ed. Porto Alegre: Bookman; 2001.
- JENKINS, W. K. *Digital Signal Processing Handbook*. Editors W.K. Madisetti e D.B. Willians. Chapman & HALL, USA, 1999.
- JIAO, J., HE, C., WU, B., FEI, R., WANG, X. *Application of wavelet transform on modal acoustic emission source location in thin plates with one sensor*. Pressure Vessels and Piping, v. 81, pp. 427-431, 2004.
- KENNEDY, J. L. *Oil and Gas pipeline fundamentals*, 2.ed., PennWell Publishing Company, Tulsa, USA, 1993, 366 p.
- KRYTER, R. C., *Loose part monitoring program and recent operational experience in selected U.S. and Western European*

commercial nuclear power station. Oak Ridge National Laboratory report, NUREG/CR-3687, 1984.

KUNZE, U. *Experience with the acoustic leakage monitoring system alues in 17 vver plants.* Progress in Nuclear Energy, v 34, nº3, p. 213-220, 1999.

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

LAPSHIN, B. M., OVCHINNIKOV, A. L. *A Cospectral Methoh for Leak Detection in One-Way Access Pipelines.* Acoustic Methods, v. 40, No. 9, pp. 587-592, 2004.

LATHI, B. P. **Sistemas de Comunicação.** Rio de Janeiro: Guanabara, 1987.

LOESCH, C.; SARI, S. T. **Redes neurais artificiais: fundamentos e modelos.** 1. ed. Blumenau: Editora da Furb, 1996.

MACIAS, I. B. *Detecção de Vazamentos em Tubulações Transportando Gás.* Dissertação de mestrado submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

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.

MALVINO, A. P. **Microcomputadores e microprocessadores.** São Paulo, McGraw-Hill, 1985.

MEDEIROS, Luciano F. **Redes neurais em Delphi.** 1. ed. Florianópolis: Visual Books, 2003.

MILLER, R.K., POLLOCK, A.A., WATTS, D.J., CARLYLE, J.M., TAFURI, A.N., YEZZI JR, J.J. *A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques.* NDT&E International, v. 32, p. 1-8, 1999.

OLIVEIRA, H. M. **Análise de Sinais para Engenheiros. Uma Abordagem via Wavelets.** Editora Brasport, Rio de Janeiro, 2007.

PETROBRAS. Balanço Sócio - Ambiental 2000. Disponível em: <<http://www2.petrobras.com.br/ResponsabilidadeSocial/portugues/pdf/BSA2000.pdf>>. Acesso em: 05/09/09.

PETROBRAS. Balanço Sócio - Ambiental 2001. Disponível em: <<http://www2.petrobras.com.br/ResponsabilidadeSocial/portugues/pdf/BSA2001.pdf>>. Acesso em: 05/09/09.

PETROBRAS. Balanço Sócio - Ambiental 2003. Disponível em: <<http://www2.petrobras.com.br/ResponsabilidadeSocial/portugues/pdf/BSA2003.pdf>>. Acesso em: 05/09/09.

PETROBRAS. Balanço Sócio - Ambiental 2008. Disponível em: <<http://www2.petrobras.com.br/ResponsabilidadeSocial/portugues/pdf/BSA2008.pdf>>. Acesso em: 05/09/09.

RIBEIRO, M. P. **Telecomunicações : Sistemas analógicos-digitais.** Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos: Embratel, 1980.

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

SHEHADEH, M., STEEL, J.A., REUBEN, R.L. *Acoustic emission source location for steel pipe and pipeline applications: the role of arrival time estimation. J. Process Mechanical Engineering*, v. 220 (E), p. 121-133, 2006.

SMITH, S. W. *Digital Signal Processing-A Pratical Guide for Engineers and Scientists*. 1.ed., Newnes Publications, USA, 2003, 650 p.

SOUZA, E. O. Detecção de Vazamentos em Tubulações Através de Método Acústico e da Análise de Transientes de Pressão. Dissertação de mestrado submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

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

TAFNER, M. A. Reconhecimento de Palavras Faladas Isoladas Usando Redes Neurais Artificiais. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

TRANSPETRO. Relatório Anual 2008. Disponível em: <http://200.184.189.110/portugues/centralInformacoes/rel_anual_ingles/Default.html>. Acesso em: 25/08/09.

WALDMAN, H. **Processamento Digital de Sinais: Conceitos Fundamentais**. Editora Kapelusz S.A, Buenos Aires, 1987.

WIECZOREK, S. *Leakage and Blockage Detection in Two-Phase Subsea Pipelines by Pressure Pulse Technology*. Norwegian University of Science and Technology, 2003.

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.

ZHANG, J. *Designing a cost effective and reliable pipeline leak detection system*. Pipeline Reliability Conference, Houston, EUA, 1996.

APÊNDICE A – Sinais e espectros de frequências para o chanfro 1

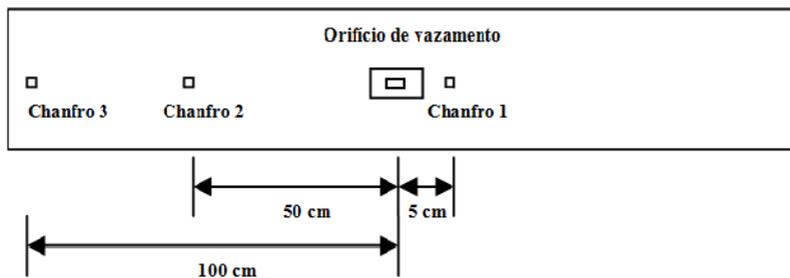
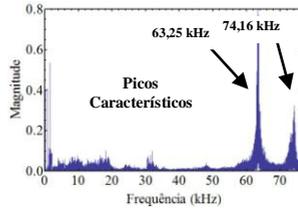
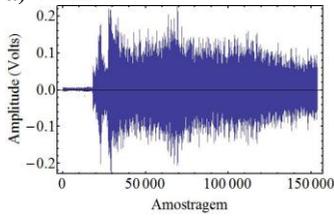


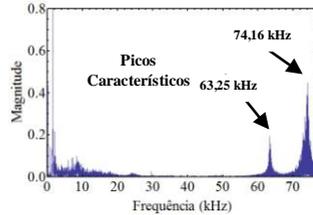
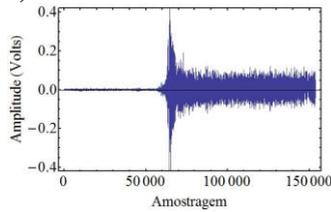
Figura 1: Esquema do posicionamento do chanfro 1 na lateral da seção de duto.

Pressão - $1,96 \times 10^5$ Pa

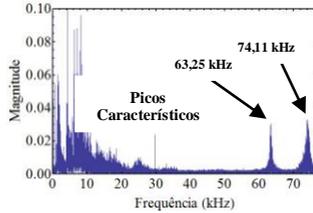
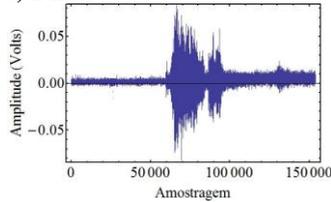
a) 4 mm



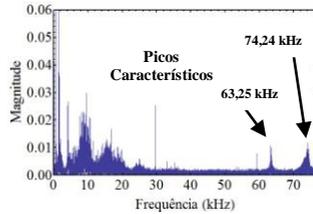
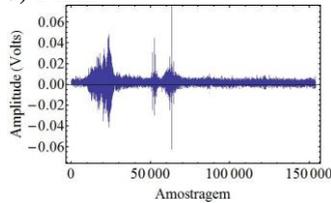
b) 3 mm



c) 2 mm



d) 1 mm



e) fenda

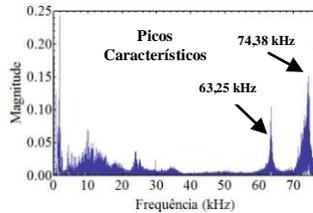
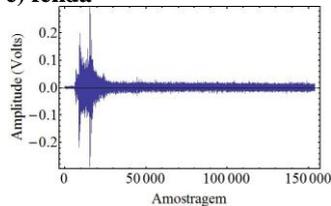
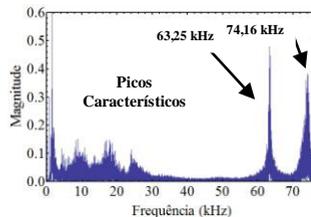
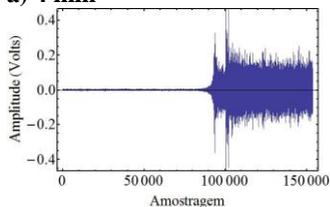


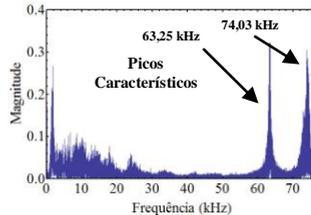
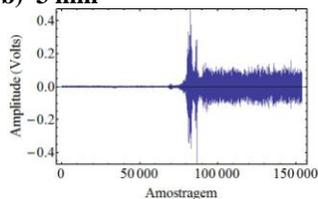
Figura 2: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências utilizando os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $1,96 \times 10^5$ Pa.

Pressão - $9,8 \times 10^5$ Pa

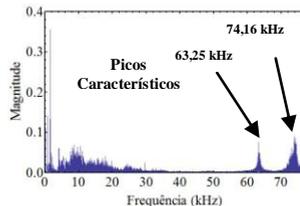
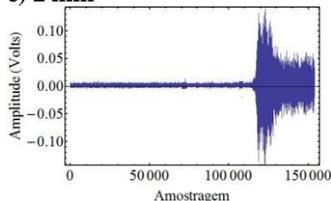
a) 4 mm



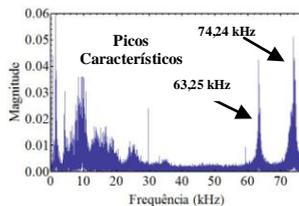
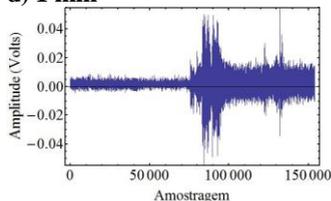
b) 3 mm



c) 2 mm



d) 1 mm



e) fenda

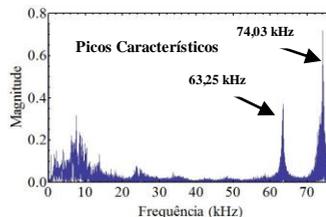
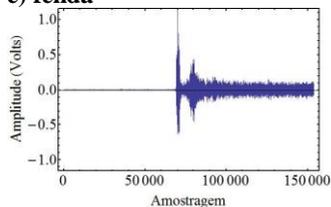


Figura 3: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências utilizando os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $9,8 \times 10^5$ Pa.

APÊNDICE B – Sinais e espectros de frequência para o chanfro 3

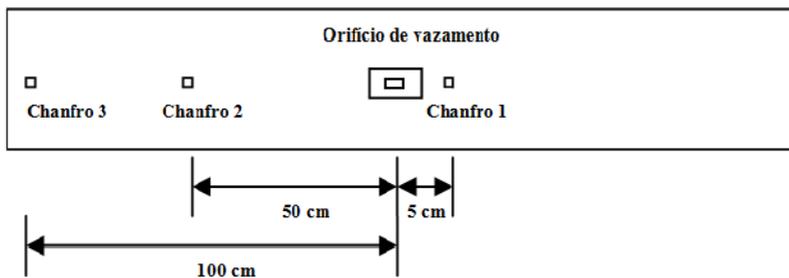
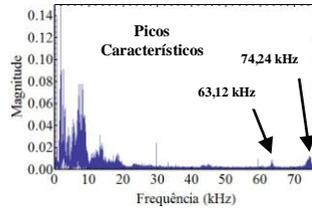
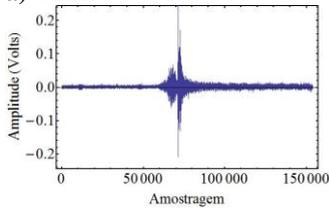


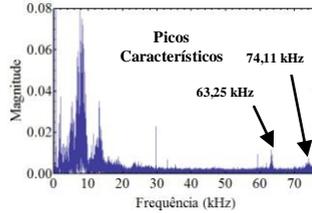
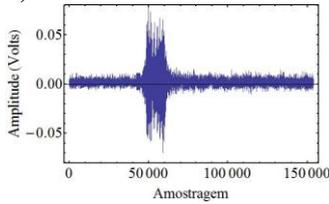
Figura 4: Esquema do posicionamento do chanfro 3 na lateral da seção de duto.

Pressão - $1,96 \times 10^5$ Pa

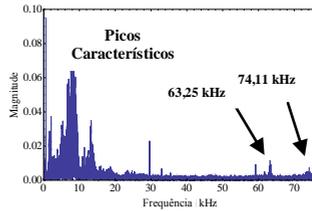
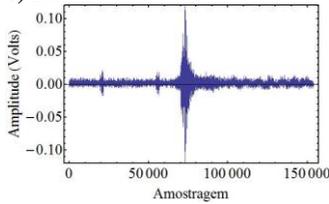
a) 4 mm



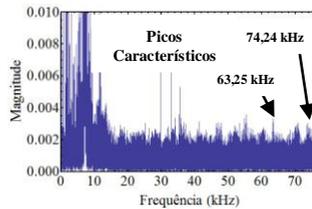
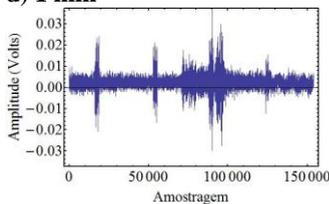
b) 3 mm



c) 2 mm



d) 1 mm



e) fenda

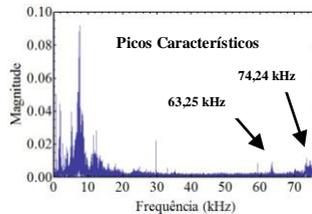
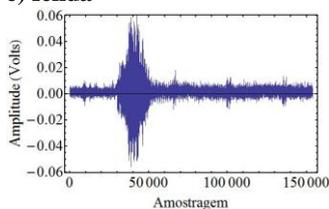


Figura 5: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências utilizando os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $1,96 \times 10^5$ Pa.

Pressão - $9,8 \times 10^5$ Pa

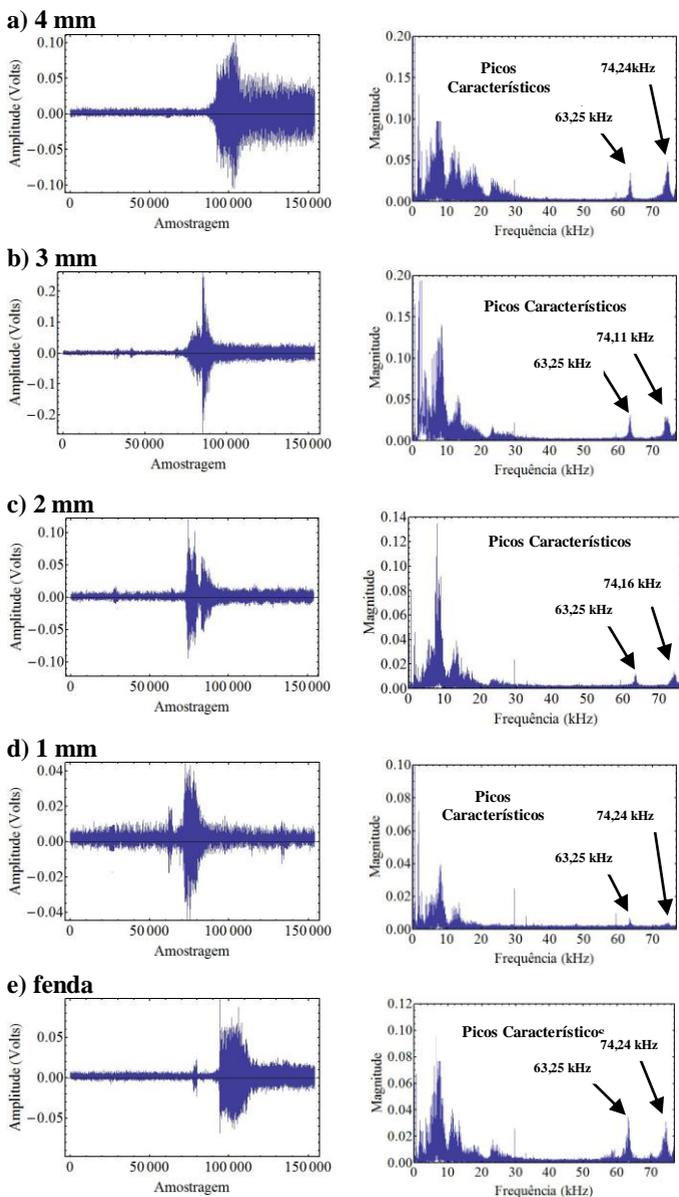


Figura 6: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências utilizando os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $9,8 \times 10^5$ Pa.

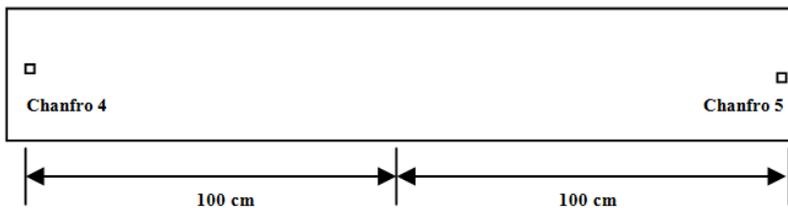
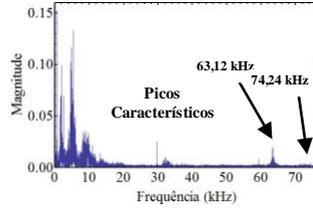
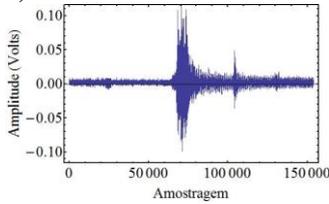
APÊNDICE C – Sinais e espectros de frequência para o chanfro 4

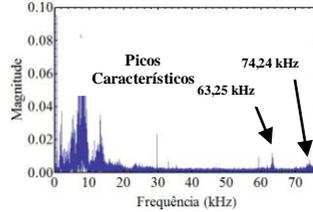
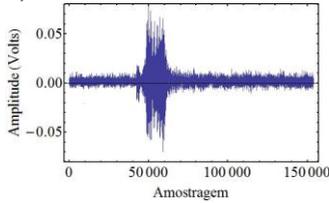
Figura 7: Esquema do posicionamento do chanfro 4 na lateral, oposta ao orifício de vazamento, da seção de duto.

Pressão - $1,96 \times 10^5$ Pa

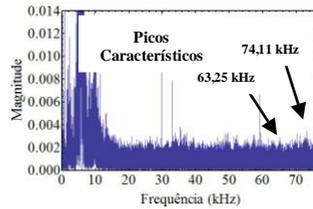
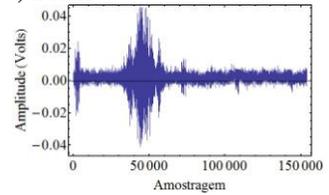
a) 4 mm



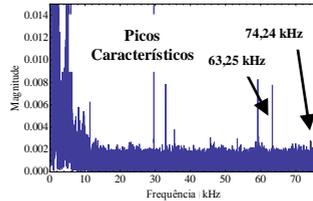
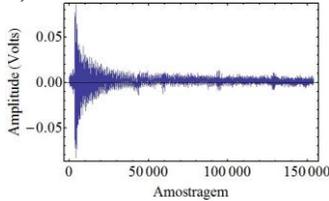
b) 3 mm



c) 2 mm



d) 1 mm



e) fenda

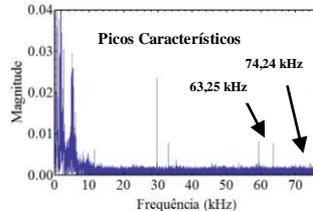
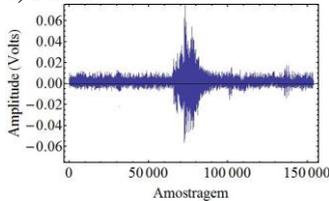
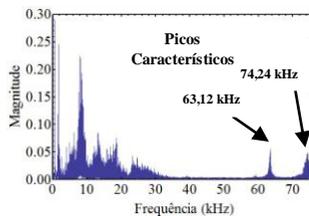
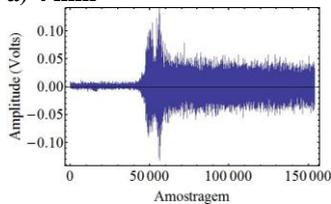


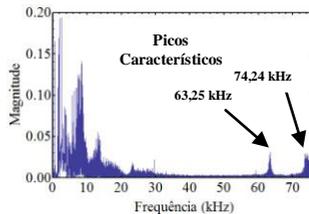
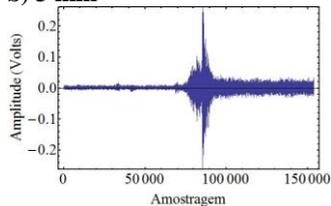
Figura 8: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências utilizando os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $1,96 \times 10^5$ Pa.

Pressão – $9,8 \times 10^5$ Pa

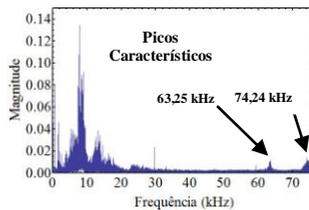
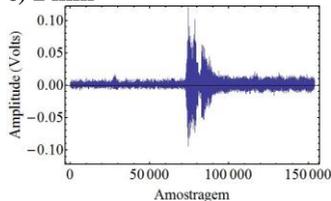
a) 4 mm



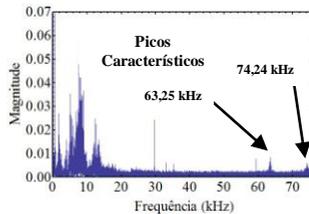
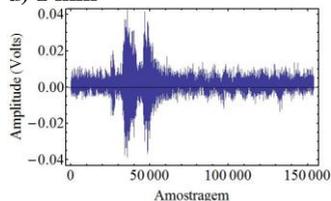
b) 3 mm



c) 2 mm



d) 1 mm



e) fenda

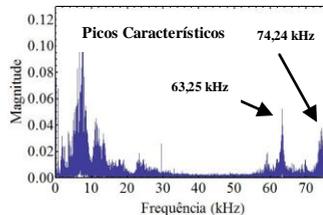
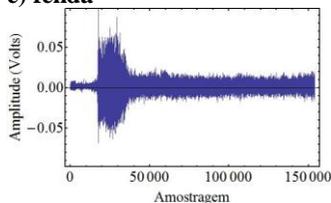


Figura 9: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências utilizando os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $9,8 \times 10^5$ Pa.

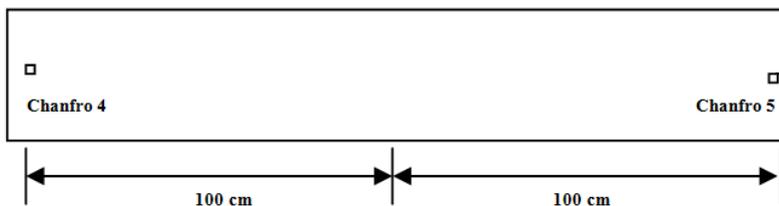
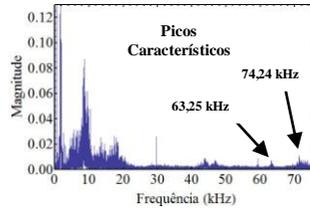
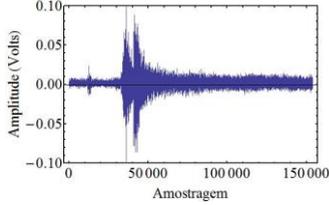
APÊNDICE D – Sinais e espectros de frequências para o chanfro 5

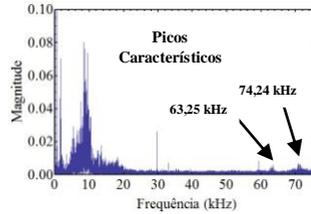
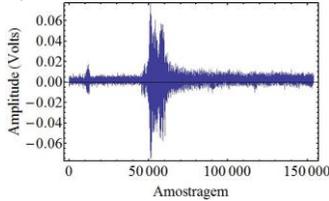
Figura 10: Esquema do posicionamento do chanfro 5 na lateral, oposta ao orifício de vazamento, da seção de duto.

Pressão - $1,96 \times 10^5$ Pa

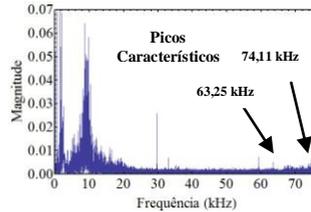
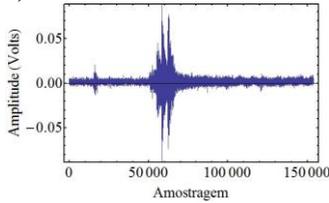
a) 4 mm



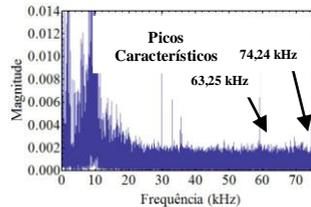
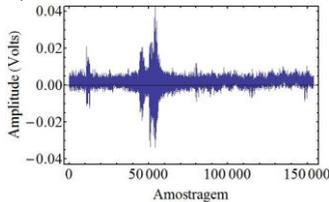
b) 3 mm



c) 2 mm



d) 1 mm



e) fenda

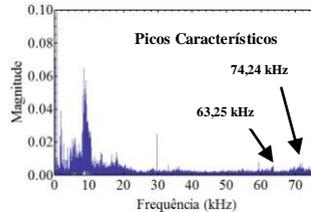
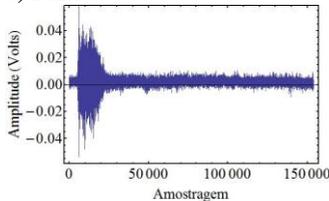


Figura 11: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências utilizando os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $1,96 \times 10^5$ Pa.

Pressão - $9,8 \times 10^5$ Pa

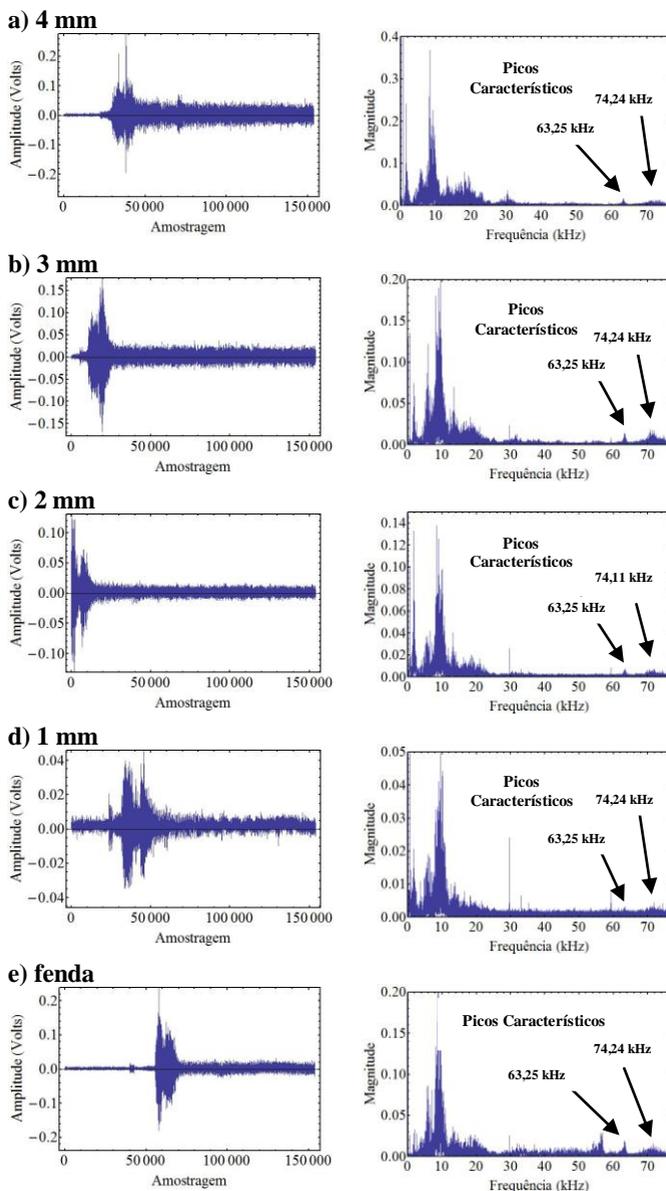


Figura 12: (a), (b), (c), (d), (e) Sinais em Volts e respectivos espectros de frequências utilizando os orifícios circulares (4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm) e a fenda (0,5 mm x 30 mm), respectivamente, à pressão de $9,8 \times 10^5$ Pa.

ANEXO A – Arquitetura da RNA com 40 dados de entrada igualmente espaçados no espectro de frequências

val =

Neural Network object:

architecture:

numInputs: 1

numLayers: 3

biasConnect: [1; 1; 1]

inputConnect: [1; 0; 0]

layerConnect: [0 0 0; 1 0 0; 0 1 0]

outputConnect: [0 0 1]

numOutputs: 1 (read-only)

numInputDelays: 0 (read-only)

numLayerDelays: 0 (read-only)

subobject structures:

inputs: {1x1 cell} of inputs

layers: {3x1 cell} of layers

outputs: {1x3 cell} containing 1 output

biases: {3x1 cell} containing 3 biases

inputWeights: {3x1 cell} containing 1 input weight

layerWeights: {3x3 cell} containing 2 layer weights

functions:

adaptFcn: 'trains'

divideFcn: (none)

gradientFcn: 'gdefaults'

initFcn: 'initlay'

performFcn: 'mse'

plotFcns: {'plottrainstate'}

trainFcn: 'trainlm'

parameters:

adaptParam: .passes

divideParam: (none)

gradientParam: (none)

initParam: (none)

performParam: (none)

trainParam: .epochs, .goal, .max_fail, .mem_reduc,
.min_grad, .mu, .mu_dec, .mu_inc,
.mu_max, .show, .time, .showCommandLine,
.showWindow

weight and bias values:

IW: {3x1 cell} containing 1 input weight matrix

LW: {3x3 cell} containing 2 layer weight matrices

b: {3x1 cell} containing 3 bias vectors

other:

name: "

userdata:(userinformation)

ANEXO B – Parâmetros de treinamento da RNA com 40 dados de entrada igualmente espaçados no espectro de frequências

epochs: 100
goal: 0
max_fail: 5
mem_reduc: 1
min_grad: $1,0 \times 10^{-10}$
mu: $1,0 \times 10^{-3}$
mu_dec: 0,1
mu_inc: 10
mu_max: $1,0 \times 10^{+010}$
show: 25
time: Inf
showCommandLine: 0
showWindow:

ANEXO C – Arquitetura da RNA com os 40 dados de entrada com maior valor de magnitude no espectro de frequências

val =

Neural Network object:

architecture:

numInputs: 1

numLayers: 3

biasConnect: [1; 1; 1]

inputConnect: [1; 0; 0]

layerConnect: [0 0 0; 1 0 0; 0 1 0]

outputConnect: [0 0 1]

numOutputs: 1 (read-only)

numInputDelays: 0 (read-only)

numLayerDelays: 0 (read-only)

subobject structures:

inputs: {1x1 cell} of inputs

layers: {3x1 cell} of layers

outputs: {1x3 cell} containing 1 output

biases: {3x1 cell} containing 3 biases

inputWeights: {3x1 cell} containing 1 input weight

layerWeights: {3x3 cell} containing 2 layer weights

functions:

adaptFcn: 'trains'

divideFcn: (none)

gradientFcn: 'gdefaults'

initFcn: 'initlay'

performFcn: 'mse'

plotFcns: {'plottrainstate'}

trainFcn: 'trainlm'

parameters:

adaptParam: .passes

divideParam: (none)

gradientParam: (none)

initParam: (none)

performParam: (none)

trainParam: .epochs, .goal, .max_fail, .mem_reduc,

```
.min_grad, .mu, .mu_dec, .mu_inc,  
.mu_max, .show, .time, .showCommandLine,  
.showWindow
```

weight and bias values:

IW: {3x1 cell} containing 1 input weight matrix

LW: {3x3 cell} containing 2 layer weight matrices

b: {3x1 cell} containing 3 bias vectors

other:

name: "

userdata:(userinformation)

ANEXO D – Parâmetros de treinamento da RNA com os 40 dados de entrada com maior valor de magnitude no espectro de frequências

epochs: 100
goal: $1,0000 \times 10^{-5}$
max_fail: 5
mem_reduc: 1
min_grad: $1,0 \times 10^{-10}$
mu: $1,0000 \times 10^{-3}$
mu_dec: 0,1
mu_inc: 10
mu_max: $1,0 \times 10^{+10}$
show: 25
time: Inf
showCommandLine: 0
showWindow: 1