



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

**TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS DE
VAZAMENTO DE LÍQUIDOS E GASES POR MEIO DE
ANÁLISE ESPECTRAL**

POLLIANA CORRÊA MORAIS

**FLORIANÓPOLIS
2012**

Polliana Corrêa Morais

Tratamento e Caracterização de Sinais de Vazamento de Líquidos e Gases por Meio de Análise Espectral

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
Coorientador: Prof. Dr. Ariovaldo Bolzan

Florianópolis
2012

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Morais, Polliana Corrêa

Tratamento e Caracterização de Sinais de Vazamento de Líquidos e Gases por Meio de Análise Espectral [dissertação] / Polliana Corrêa Moraes ; orientador, Marinho Bastos Quadri ; coorientador, Ariovaldo Bolzan. - Florianópolis, SC, 2012.

179 p. ; 21cm

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

Inclui referências

1. Método acústico. 2. Processamento de Sinais. 3. Detecção de Vazamentos. I. Quadri, Marinho Basos. II. Bolzan, Ariovaldo . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

Polliana Corrêa Morais

**TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS DE
VAZAMENTO DE LÍQUIDOS E GASES POR MEIO DE
ANÁLISE ESPECTRAL**

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 Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri
Orientador

Prof. Dr. Ariovaldo Bolzan
Coorientador

Prof. Dr. Leonel Teixeira Pinto
Coordenador do CPGENQ

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Julio Elias Normey Rico
DAS/UFSC

Prof. Dr. Ricardo Antônio Francisco Machado
CPGENQ/UFSC

Prof. Dr. Leonel Teixeira Pinto
CPGENQ/UFSC

Dedico este trabalho a minha amada mãe Regina Corrêa, com muito carinho e admiração.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e motivação.

Aos amigos Jeferson Giaretton, Monique Del Rei, Flávia Morini Garcia e Érika Imada Barcelos por toda ajuda que me foi prestada ao longo deste trabalho.

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;

“É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se a derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem nessa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota.”
(Theodore Roosevelt)

RESUMO

Este trabalho descreve a caracterização, baseada no método acústico, de sinais gerados por vazamentos de fluidos em dutos. O sensor utilizado foi um microfone de baixo custo cuja faixa de medição era de 20 Hz a 20 kHz. Para o tratamento dos sinais aqui estudados utilizou-se a Transformada Discreta de Fourier. A primeira etapa deste trabalho consistiu na realização de experimentos em uma seção de duto de aço inox com 2 m de comprimento, 0,1 m de diâmetro interno, com espessura da parede de 5,7 mm na qual era possível utilizar orifícios de vazamentos circulares com diâmetros de 1, 2, 3 e 4 mm e também uma fenda com dimensões de 0,5mm x 30 mm. Os testes de vazamento foram feitos tanto com água quanto com ar comprimido com pressões de $1,96 \cdot 10^5$ e $5,9 \cdot 10^5$ Pa. Após a análise dos dados obtidos foi constatada a presença de regiões de frequências características para esses vazamentos. Para descrever essas regiões foram ajustadas curvas Gaussianas de primeira e terceira ordem. Isso possibilitou o acesso a informações como a magnitude, frequências médias e o desvio padrão desses dados. A segunda etapa consistiu na realização de experimentos de vazamentos em um circuito de dutos fechado (UEEM). Nesses casos foi utilizada a pressão de $1,6 \cdot 10^5$ Pa e os orifícios circulares também foram de 1, 2, 3 e 4 mm de diâmetro e uma fenda de 1 mm x 15 mm. Diferentemente dos resultados obtidos na seção de duto, na UEEM foram obtidos picos de frequências característicos dos vazamentos. Na terceira e última etapa deste trabalho foram analisados casos de não vazamento como a abertura e o fechamento de válvulas, o escoamento de fluido e o ruído presente no ambiente. Com a análise desses casos foi possível evidenciar a distinção entre as frequências pertinentes a casos de vazamento com as que não são. Dessa maneira, este método estudado se mostrou promissor para a detecção de vazamentos em dutos da indústria de petróleo e gás.

Palavras-Chave: Método acústico, Processamento de Sinais, Detecção de Vazamentos.

ABSTRACT

This work describes the characterization of signals generated by fluid leaks in pipeline based on acoustic method. The sensor used was a low cost microphone whose measurement range of 20 Hz to 20 kHz. The Discrete Fourier Transform was used for the signal processing. The first stage of this work consisted of experiments on a section of pipeline made of stainless steel pipe with 2 m long, 0,1 m insider diameter, with wall thickness of 5,7 mm in which it was possible to use plates with diameter holes of 1, 2, 3 and 4 mm and also a gap with dimensions of 0.5 mm x 30 mm. The leakage tests were made both with water and compressed air at pressures $1,96 \cdot 10^5$ and $5,9 \cdot 10^5$ Pa. After analyzing the data obtained there was a hump like characteristic frequencies for these leaks. To describe these hump first and third order Gaussian curves were adjusted. This enabled to access information such as magnitude, frequency and standard deviation of the data. The second stage was to perform experiments of leaks in the UEEM. In these cases $1,6 \cdot 10^5$ Pa pressure and plates with diameter holes 1, 2, 3 and 4 mm and a gap of 1 mm x 15 mm was used. Differently from results obtained in the section of pipeline in UEEM frequency peaks were obtained to characteristic the leaks. In the third, and final stage of this work, were analyzed not leak cases. With the analysis of these cases was possible to demonstrate the distinction between the characteristic frequencies from not leak cases. Therefore, this study has shown a promising method for leak detection in pipelines of oil and gas industry.

Keywords: Acoustic Method, Signal Processing, Leak Detection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão dos métodos de detecção de vazamentos proposta por Zhang, 1996.....	6
Figura 2 – Ciclo para a conversão de A/D.	15
Figura 3 – Sinal de uma senóide de frequência de 1 Hz.....	16
Figura 4 – Sinal resultante com a frequência de amostragem de 2 Hz..	16
Figura 5 – Sinal resultante com a frequência de amostragem de 3 Hz..	17
Figura 6 – Sinal resultante com a frequência de amostragem de 1,5 Hz.	17
Figura 7 – Sinal final obtido com a taxa de amostragem de 1,5 HZ.	18
Figura 8 – Bancada experimental do LCP.....	23
Figura 9 – Esquema da Unidade Experimental de Escoamento Multifásico.	24
Figura 10 – Duto para detecção de vazamentos inserido na linha da UEEM.	25
Figura 11 – Resposta do sistema para Frequência de 20 Hz.	26
Figura 12 – Resposta do sistema para Frequência de 2000 Hz.	26
Figura 13 - Resposta do sistema para Frequência de 20000 Hz.....	26
Figura 14 - Esquema de um microfone.	27
Figura 15 – Placas planas com orifícios circulares de diâmetros de 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm e fendas de 0,5 mm x 30 mm e 1 mm x 15 mm. Em a) estão as placas utilizadas no LCP e em b) as da UEEM.	30
Figura 16 – Detalhe da abertura na parede da seção do duto.	30
Figura 17 – Fechadura eletromagnética.	31
Figura 18 – Etapas iniciais do vazamento.	33
Figura 19 – Ensaio de vazamento de água.	34
Figura 20 – Configuração do sistema nos ensaios de vazamento de ar.	35
Figura 21 – Vazamentos de Água realizados no LCP: em a), b), c), d) e e) estão apresentados os sinais dos vazamentos (Amplitude x Tempo) e os respectivos espectros de frequência.....	37
Figura 22 – Diagramas tempo-frequência do Vazamento de Água LCP – 2 mm $1,96 \cdot 10^5$ Pa e do Vazamento de Água LCP - Fenda $1,96 \cdot 10^5$ Pa.	43
Figura 23 – Curvas ajustadas para os vazamentos de água no LCP com pressão interna do duto de $1,96 \cdot 10^5$ Pa.....	47

Figura 24 – Influência do diâmetro do orifício de vazamento no espectro dos vazamentos de água do LCP para a pressão de $1,96.10^5$ Pa	49
Figura 25 – Vazamentos de Água realizados no LCP: em a), b), c), d) e e) estão apresentados os sinais dos vazamentos (Amplitude x Tempo) e os respectivos espectros de frequência.....	50
Figura 26 – Diagramas tempo-frequência do Vazamento de Água LCP – 1 mm $5,9.10^5$ Pa e do Vazamento de Água LCP - Fenda $5,9.10^5$ Pa.	54
Figura 27 – Curvas ajustadas para os vazamentos de água no LCP com pressão interna do duto de $5,9.10^5$ Pa.	57
Figura 28 – Influência do diâmetro do orifício de vazamento no espectro dos vazamentos de água do LCP para a pressão de $5,9.10^5$ Pa.	59
Figura 29 – Influência da pressão para vazamento de água com orifício de vazamento de 1 mm.....	60
Figura 30 – Influência da pressão para vazamento de água com orifício de vazamento de 2 mm.....	60
Figura 31 – Influência da pressão para vazamento de água com orifício de vazamento de 3 mm.....	61
Figura 32 – Influência da pressão para vazamento de água com orifício de vazamento de 4 mm.....	61
Figura 33 – Influência da pressão para vazamento de água com a fenda como orifício de vazamento.	62
Figura 34 – Vazamentos de Água realizados na UEEM: em a), b), c), d) e e) estão apresentados os sinais dos vazamentos (Amplitude x Tempo) e os respectivos espectros de frequência.	64
Figura 35 – Diagramas tempo-frequência dos Vazamentos de Água da UEEM de 1, 2, 3 e 4 mm com pressão interna de $1,6.10^5$ Pa.....	68
Figura 36 – Vazamentos de Ar realizados no LCP: em a), b), c), d) e e) estão apresentados os sinais dos vazamentos (Amplitude x Tempo) e os respectivos espectros de frequência.	71
Figura 37 – Diagramas tempo-frequência do Vazamento de Ar LCP – 1 mm $1,96.10^5$ Pa e do Vazamento de Ar LCP - Fenda $1,96.10^5$ Pa.....	76
Figura 38 – Gaussianas de terceira ordem ajustadas para os vazamentos de ar com pressão de $1,96.10^5$ Pa.....	81
Figura 39 – Gaussianas de primeira ordem ajustadas para os vazamentos de ar com pressão de $1,96.10^5$ Pa.....	84

Figura 40 – Influência do diâmetro do orifício de vazamento nos espectros de vazamentos de ar do LCP para pressão de $1,96 \cdot 10^5$ Pa.....	86
Figura 41 – Vazamentos de Ar realizados no LCP: em a), b), c), d) e e) estão apresentados os sinais dos vazamentos (Amplitude x Tempo) e os respectivos espectros de frequência.	87
Figura 42 – Diagramas tempo-frequência em 3D do Vazamento de Ar LCP – 1 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa e do Vazamento de Ar LCP - Fenda $5,9 \cdot 10^5$ Pa. Em a) e c) têm-se as vistas superiores e em b) e d) as vistas laterais dos respectivos vazamentos.	92
Figura 43 – Gaussianas de terceira ordem ajustadas para os vazamentos de ar com pressão de $5,9 \cdot 10^5$ Pa.	97
Figura 44 – Gaussianas de primeira ordem ajustadas para os vazamentos de ar com pressão de $5,9 \cdot 10^5$ Pa.	100
Figura 45 – Influência do diâmetro do orifício de vazamento nos espectros de vazamentos de ar do LCP para pressão de $5,9 \cdot 10^5$ Pa.....	102
Figura 46 – Influência da pressão nos espectros de vazamentos de ar do LCP para o orifício de vazamento de 1 mm.	103
Figura 47 – Influência da pressão nos espectros de vazamentos de ar do LCP para o orifício de vazamento de 2 mm.	103
Figura 48 – Influência da pressão nos espectros de vazamentos de ar do LCP para o orifício de vazamento de 3 mm.	104
Figura 49 – Influência da pressão nos espectros de vazamentos de ar do LCP para o orifício de vazamento de 4 mm.	104
Figura 50 – Influência da pressão nos espectros de vazamentos de ar do LCP para a fenda como orifício de vazamento.	105
Figura 51 – Vazamentos de Ar realizados na UEEM: em a), b), c), d) e e) estão apresentados os sinais dos vazamentos (Amplitude x Tempo) e os respectivos espectros de frequência.	106
Figura 52 – Diagramas tempo-frequência dos Vazamentos de Ar da UEEM de 1, 2, 3, 4 mm e da fenda com pressão interna de $1,6 \cdot 10^5$ Pa.	111
Figura 53 – Espectro de frequência obtido por SINGH, 2011.	115
Figura 54 - Espectro de frequência obtido por SINGH, 2011.	115
Figura 55 – Espectro do Golpe no Duto e a vista 3D tempo-frequência.	116

Figura 56 – Golpe no duto <i>versus</i> Casos de vazamento.....	118
Figura 57 – Espectro oriundo do Agitador de Peneiras e o respectivo diagrama tempo-frequência.....	120
Figura 58 – Agitador de peneiras <i>versus</i> Casos de vazamento.	121
Figura 59 – Espectro do Compressor e o respectivo diagrama tempo-frequência.....	123
Figura 60 – Compressor <i>versus</i> Casos de vazamento.	124
Figura 61 – Espectro do Ruído da Casa de utilidades e o respectivo diagrama tempo-frequência.....	126
Figura 62 – Ruído da casa de utilidades <i>versus</i> Casos de vazamento.	127
Figura 63 – Espectro tempo-frequência em 3d da abertura da válvula para entrada de ar com microfone distante a 50 cm do duto e com ele fixo. Em a) e c) têm-se as vistas superiores e em b) e d) as vistas laterais.	130
Figura 64 – Espectro de frequência da Abertura da válvula para entrada de ar com microfone distante a 50 cm do duto e com ele fixo.....	132
Figura 65 – Abertura de válvula para entrada de ar <i>versus</i> Casos de vazamento.	133
Figura 66 – Diagramas tempo-frequência do escoamento de ar com microfone distante a 50 cm do duto e com ele fixo.	134
Figura 67 – Espectro de frequência do Escoamento de ar com microfone distante a 50 cm do duto e com ele fixo.....	136
Figura 68 – Escoamento de ar <i>versus</i> Casos de vazamento.	137
Figura 69 – Diagramas tempo-frequência do Escoamento de ar com microfone a 50 cm do duto.	138
Figura 70 – Espectro tempo-frequência do fechamento da válvula de entrada do ar com microfone distante a 50 cm do duto e com ele fixo.	139
Figura 71 – Espectro de frequência do Fechamento da válvula de entrada do ar com microfone distante a 50 cm do duto e com ele fixo.	141
Figura 72 – Fechamento da válvula de entrada de ar <i>versus</i> Casos de vazamento.	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Significados das variáveis das Equações 1, 2 e 3.....	8
Tabela 2 - Comparação entre os Métodos de Detecção de Vazamentos.	12
Tabela 3 – Valores de pressão utilizados para cada placa plana nos ensaios de vazamento da primeira e segunda etapa.....	32
Tabela 4 – Descrição dos ensaios de não vazamento.	33
Tabela 5 - Descrição dos ensaios de não vazamento.....	36
Tabela 6 - Valores das constantes das Gaussianas ajustadas para Vazamento de Água a $1,96.10^5$ Pa.	45
Tabela 7 - Valores das constantes das Gaussianas ajustadas para Vazamento de Água a $5,9.10^5$ Pa.	56
Tabela 8 - Influência Provocada pelo Aumento de Pressão nos Sinais de Vazamentos Obtidos.	62
Tabela 9 - Valores das constantes das Gaussianas de terceira ordem ajustadas para o Vazamento de Ar com $1,96.10^5$ Pa.	78
Tabela 10 - Valores das constantes das Gaussianas de primeira ordem ajustadas para Vazamento de Ar com $1,96.10^5$ Pa.	82
Tabela 11 - Valores das constantes das Gaussianas de terceira ordem ajustadas para Vazamento de Ar com $5,9.10^5$ Pa.	94
Tabela 12 - Valores das constantes das Gaussianas de primeira ordem ajustadas para Vazamento de Ar com $5,9.10^5$ Pa.	98
Tabela 13 - Influência Provocada pelo Aumento de Pressão nos Sinais de Vazamentos Obtidos.....	105
Tabela 14 - Valores dos picos de frequência encontrados para Vazamento de Ar UEEM.	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
A/D	Analógico para Digital
DAS	Departamento de Automação e Sistemas
D/A	Digital para Analógico
LCP	Laboratório de Controle de Processos
Mboe/d	Mil barris de óleo equivalente por dia
PRH34	Programa de Recursos Humanos nº 34
REPLAN	Refinaria do Planalto Paulista
TDF	Transformada Discreta de Fourier
TF	Transformada de Fourier
TRF	Transformada Rápida de Fourier
UEEM	Unidade Experimental de Escoamento Multifásico

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área transversal da tubulação
a_1	Constante da Gaussiana correspondente à magnitude do sinal
b_1	Constante da Gaussiana correspondente à frequência média do sinal
c_1	Constante da Gaussiana correspondente ao desvio-padrão do sinal
cm	Centímetro
c_p	Calor específico a pressão constante
$C(t)$	Capacitância
c_w	Capacitância termal do material da tubulação por unidade de comprimento
D	Diâmetro da tubulação
d_0	Distância entre as placas do capacitor com o sistema em repouso
f	Fator de fricção de Darcy-Weisbach
g	Aceleração da gravidade
h	Hora
i	Contador
k	Contador
kHz	Quilohertz
K_H	Coefficiente de transferência de calor por unidade de comprimento
km	Quilômetro
K_m	Constante de mola da membrana flexível
l	Distância
m	Metro
$m \cdot s^{-2}$	Metro por segundo ao quadrado
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro
mV	Milivolt
N	Período do Sinal
P	Pressão
Q	Carga no capacitor
s	Segundo
t	Tempo
T_F	Temperatura do fluido
T_G	Temperatura do ambiente

U	Velocidade do fluido
V	Volt
$v(t)$	Tensão nos terminais do capacitor
W_m	Frequência máxima
$x(t)$	Sinal
$X(w)$	Espectro de frequência
$x[k]$	Sequência analisada
$X[k]$	Coefficiente de Fourier do sinal amostrado
$x_s(t)$	Sinal amostrado
α	Constante de proporcionalidade
α_1	Velocidade da onda acústica no fluido
β	Constante
γ	Constante
ε	Entalpia
$\Delta_p(t)$	Sinal sonoro
$\Delta_x(t)$	Varição da posição da placa móvel do capacitor
ρ	Densidade
θ	Ângulo do duto em relação ao eixo horizontal

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura do trabalho	3
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1 Classificação dos Métodos de Detecção de vazamentos	5
2.1.1 Métodos Biológicos.....	6
2.1.2 Métodos de <i>Software</i>	7
2.1.2.1 Mudança de Fluxo ou Pressão.....	7
2.1.2.2 Modelagem do Sistema	7
2.1.2.3 Métodos Baseados em Análise Estatística	9
2.1.3.1 Sensor de Pressão.....	10
2.1.3.2 Sensor de Vazão	10
2.1.3.3 Sensor Infravermelho	11
2.1.3.4 Sensor Acústico.....	11
2.2 Comparação entre os Métodos de Detecção de Vazamentos	12
2.3 Histórico de Pesquisas no Laboratório de Controle de Processos (LCP).....	13
2.4 Digitalização e Tratamento de Sinais	14
2.4.1 Teorema de Nyquist	15
2.4.2 Quantização.....	18
2.4.3 Transformada de Fourier	19
CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1 Material	23

3.1.1	Bancada Experimental do Laboratório de Controle de Processos (LCP)	23
3.1.2	Unidade Experimental de Escoamento Multifásico (UEEM/DAS).....	24
3.1.3	Equipamentos Utilizados nos Experimentos.....	25
3.1.3.1	Microfone.....	25
3.1.3.2	Computador.....	29
3.1.3.3	Manômetro	29
3.1.3.4	Placas Utilizadas Para Simulações de Vazamento	29
3.1.3.5	Fechadura Eletromagnética.....	30
3.1.3.6	Compressor	31
3.1.3.7	Peneira de Separação de Sólidos.....	31
3.2	Metodologia dos Experimentos.....	31
3.2.1	Ensaio na Bancada Experimental do LCP.....	31
3.2.1.1	Primeira Etapa: Ensaio de Vazamentos de Água	32
3.2.1.2	Segunda Etapa: Ensaio de Vazamentos de Ar.....	33
3.2.1.3	Terceira Etapa: Ensaio de Não Vazamento	33
3.2.2	Ensaio na Bancada Experimental da UEEM	34
3.2.2.1	Primeira Etapa: Ensaio de Vazamento de Água.....	34
3.2.2.2	Segunda Etapa: Ensaio de Vazamento de Ar	35
3.2.2.3	Terceira Etapa: Ensaio de Não Vazamento	35
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES		37
4.1	Vazamentos de Água.....	37
4.2	Vazamentos de Ar	70
4.3	Casos de Não Vazamento.....	115
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....		143
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	144

CAPÍTULO VI – BIBLIOGRAFIA..... 145

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo caracterizar os sinais obtidos a partir de situações de vazamento em dutos. Neste capítulo, é descrita a justificativa do trabalho, além de serem apresentados os objetivos.

1.1 Justificativa

Segundo o Boletim da Produção pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) de fevereiro de 2012, a produção de petróleo e gás no Brasil já ultrapassou a marca dos 2,6 mil barris de óleo equivalente por dia (Mboe/d) o que representa um aumento de cerca de 7% da produção em relação a fevereiro de 2011. Ainda, segundo a agência, com as descobertas do Pré-sal, esse nível de produção deverá dobrar até 2020.

É evidente que para essa expansão da atividade econômica é necessário haver um aumento substancial dos investimentos em infraestrutura o qual durante décadas foi negligenciado. Um dos principais pontos a ser levado em consideração será a expansão da rede de dutos.

De acordo com a revista Monitor Mercantil, o setor dutoviário brasileiro possui atualmente cerca de 22 mil quilômetros de malha em operação, entre gasodutos, dutos submarinos e minerodutos e ocupa uma modesta 16ª posição no ranking mundial do setor. Nessa posição, está atrás de países com extensão territorial menor, como México (40 mil quilômetros), Argentina (38 mil) e Austrália (32 mil), e está muito distante dos mais de 400 mil quilômetros dos norte-americanos e dos 800 mil quilômetros de dutos existentes na União Europeia. Consequentemente, há um grande potencial a ser explorado nesse setor.

Além da demanda gerada pelos produtos derivados de petróleo, deve-se somar a necessidade de escoamento do etanol aqui produzido. Esse biocombustível ainda é transportado por via rodoviária a qual já está demasiadamente congestionada e deteriorada. Isso faz com que os custos operacionais envolvidos no escoamento desse produto sejam elevados. Em 2011, houve a inauguração da primeira etapa de 202 quilômetros de etanolduto entre Ribeirão Preto e Paulínia. O total da obra será de 850 quilômetros que ligará a região produtora de Jataí (GO) à refinaria REPLAN (Refinaria do Planalto Paulista) localizada em Paulínia. Conforme apresentado pelos diretores das empresas construtoras desse etanolduto, a utilização dele diminuirá em 20% os

custos totais do transporte e o volume do etanol transportado equivale a 1,3 milhão de viagens de caminhões por ano. Isso representa uma redução de 1.063 mil toneladas de CO₂ por ano.

O modal dutoviário além de apresentar solução logística de menor custo operacional entre as alternativas disponíveis é ecologicamente a mais aceitável por permitir que grandes quantidades de produtos líquidos sejam transportadas de maneira segura e limpa. A implantação e a expansão de um projeto dutoviário requerem vários estudos socioambientais para a verificação dos impactos ambientais causados na área onde ele for realizado (MURTA, 2003).

Com esse cenário de expansão da malha dutoviária, surge a necessidade da instalação de sistemas de inspeção e detecção de vazamentos rápidos e precisos. Isso porque esses vazamentos podem causar graves acidentes, com risco de perdas humanas, danos ao meio ambiente e perdas materiais. Por essas razões, é essencial que malhas de dutos de transporte de óleo e gás possuam algum sistema de detecção de vazamentos.

Neste trabalho, visa-se o desenvolvimento de um método que caracterize de maneira adequada o sinal gerado por vazamentos de líquidos e gases em uma seção de duto e também em um circuito fechado.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é dar continuidade à linha de pesquisa já existente no Laboratório de Controle de Processos do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina que visa à caracterização acústica de vazamentos a partir de dutos para aplicações na indústria de petróleo e gás. Para isso, será utilizada água para estudar o vazamento de um líquido e ar comprimido para o caso de um gás.

De forma específica seu desenvolvimento visou a:

- Realização de um estudo de revisão sobre a temática dos vazamentos em dutos na indústria de petróleo e gás colocando em evidência a importância de pesquisas nessa área;
- Realização de experimentos de vazamentos em dutos de forma sistemática para captação e gravação de sinais.
- Obtenção de uma boa caracterização da assinatura acústica do vazamento. O desafio principal é discriminar a assinatura do vazamento dos ruídos normalmente emitidos em um duto,

oriundos das vibrações de bombeamento, da turbulência do escoamento e de abertura e fechamento de válvulas.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos, iniciando-se por este, a Introdução.

No Capítulo II encontra-se uma detalhada revisão sobre os principais métodos de detecção de vazamentos existentes. São apresentados também os principais aspectos relativos à digitalização e ao tratamento de sinais.

No Capítulo III são apresentados os materiais utilizados neste trabalho e também a metodologia praticada nos ensaios de vazamentos.

No Capítulo IV são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de vazamento e a discussão sobre eles.

O Capítulo V contém as conclusões finais resultantes deste estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

No Capítulo VI são apresentadas as referências bibliográficas que serviram de fundamentação teórica para a realização deste trabalho.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre os tópicos envolvidos neste trabalho, destacando-se o histórico e metodologias de detecção de vazamentos em dutos além da Transformada de Fourier a qual foi utilizada no tratamento dos sinais utilizados.

2.1 Classificação dos Métodos de Detecção de vazamentos

O transporte de fluidos via dutovias é uma forma barata, segura, confiável e eficiente inclusive no caso do petróleo e seus derivados. Esse tipo de transporte apresenta um risco operacional inerente devido às altas pressões e vazões as quais tanto o fluido quanto o material do duto são submetidos.

As principais causas de acidentes em oleodutos e gasodutos estão ligadas a:

- Falhas operacionais;
- Corrosão;
- Movimentação do solo;
- Fenômenos naturais e
- Ações externas não intencionais ou não autorizadas como as ligações clandestinas (PAPADAKIS, *et al.*, 1999).

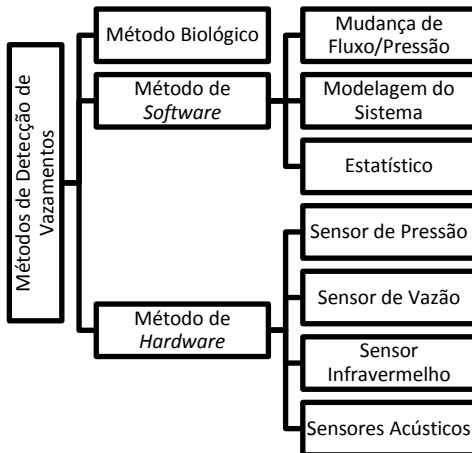
Deste modo, visando à melhoria dos níveis de segurança deste modo de transporte, vultosos investimentos têm sido aplicados para o desenvolvimento de novas tecnologias para a atividade dutoviária em todo o mundo. Nesses investimentos, incluem-se os estudos relacionados aos sistemas de detecção de vazamentos.

De acordo com PEREIRA (2001, apud AZEVEDO, 2009), os sistemas de detecção de vazamentos não evitam a ocorrência do vazamento, mas são uma forte ferramenta para diminuir em muito as suas proporções, permitindo atuar rapidamente, alarmando e indicando as situações de vazamento e estimando o local, vazões e volumes vazados.

Além disso, vale ressaltar que a seleção da melhor metodologia de detecção depende de uma série de fatores desde as características da rede, do fluido, capacidade de instrumentação e comunicação de dados, até os interesses econômicos envolvidos (ALASKA DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION, 2006).

Esses sistemas de detecção podem ser classificados conforme a divisão feita por ZHANG (1996) a qual é uma das mais utilizadas atualmente. Ele dividiu as metodologias em três grupos principais, método biológico, por *software* e por *hardware*, os quais podem ser evidenciados na Figura 1. Apesar do que indica a nomenclatura, é fundamental ressaltar que os métodos biológicos e por *hardware* também podem fazer uso de *softwares* para auxiliar no processamento das informações. De outro modo, os métodos de detecção de vazamentos por *software* têm esse nome porque dependem exclusivamente de um *software* para realizar a detecção, (STARR, 2006).

Figura 1 – Divisão dos métodos de detecção de vazamentos proposta por Zhang, 1996.



2.1.1 Métodos Biológicos

Os métodos biológicos permitem identificar os vazamentos através de inspeção visual periódica, da detecção de odor característico, de ruído sonoro e também na experiência pessoal dos operadores das linhas. Esses são os métodos mais simples e baratos dentre os demais que serão apresentados. Geralmente esses métodos são eficazes quando aplicados a pequenas redes de escoamento, ou nas extremidades finais de uma grande rede.

2.1.2 Métodos de *Software*

Segundo STARR, 2006, nesses métodos são utilizados dados (geralmente pressão e vazão) de sensores já disponíveis no duto, normalmente nas estações de compressão ou de entrega, para buscar irregularidades que indiquem a presença de um possível vazamento. Os dados gerados são armazenados em uma base de dados do processo, sendo esta continuamente analisada pelo *software* especialista.

2.1.2.1 Mudança de Fluxo ou Pressão

Nessa técnica, assume-se que a ocorrência do vazamento esteja relacionada a grandes variações da pressão e do fluxo a montante e a jusante do duto. Se em determinado intervalo a taxa de mudança for superior a um padrão definido, o alarme de vazamento será acionado (SOUZA, 2007).

Quando ocorre o rompimento da parede da tubulação há a repentina queda de pressão no local do vazamento formando-se uma “onda de pressão”. Essa onda resultante percorre a tubulação em ambos os sentidos e pode ser detectada nos sensores de pressão. Nesse método, a sensibilidade é parametrizada, conseqüentemente é possível deixar o detector mais ou menos sensível a determinadas variações e isso normalmente gera um impacto direto sobre o número de alarmes falsos. (VAZ JÚNIOR, 2010).

2.1.2.2 Modelagem do Sistema

Essa técnica faz a modelagem do sistema de escoamento na qual são utilizadas as equações de conservação de massa, de momento, de energia e as equações de estado do fluido. Este grupo de equações diferenciais não lineares é resolvido simultaneamente através de técnicas computacionais tais como o Método de Diferenças Finitas e o Método dos Volumes Finitos (COLOMBAROLI, 2009).

Um exemplo de aplicação desse método de detecção de vazamento está em LIOU (1983), que utilizou as seguintes equações diferenciais para modelar o caso de vazamento em um duto.

$$\begin{aligned} & \text{LEI DE CONSERVAÇÃO DA MASSA:} \\ & \frac{\partial P}{\partial t} + \rho \alpha_1^2 \frac{\partial U}{\partial l} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

LEI DE CONSERVAÇÃO DO MOMENTO:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} + \rho f \frac{U \cdot |U|}{2D} + \rho g \sin(\theta) = 0 \quad (2)$$

LEI DE CONSERVAÇÃO DA ENERGIA:

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial P} - \frac{1}{\rho} \right) \frac{\partial P}{\partial t} + \left(\frac{c_w}{\rho A} + c_p \right) \frac{\partial T_F}{\partial t} = 4K_H \frac{(T_G - T_F)}{\rho D} + f \frac{|U|^3}{2D} \quad (3)$$

Os significados de cada uma das variáveis utilizadas estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Significados das variáveis das Equações 1, 2 e 3.

Variável	Significado
α_1	Velocidade da onda acústica no fluido
A	Área transversal da tubulação
c_p	Calor específico a pressão constante
c_w	Capacitância termal do material da tubulação por unidade de comprimento
D	Diâmetro da tubulação
ε	Entalpia
f	Fator de fricção de Darcy-Weisbach
G	Aceleração da gravidade
K_H	Coefficiente de transferência de calor por unidade de comprimento
l	Distância
P	Pressão
t	Tempo
T_F	Temperatura do fluido
T_G	Temperatura do ambiente
U	Velocidade do fluido
ρ	Densidade
θ	Ângulo do duto em relação ao eixo horizontal

Os sistemas de detecção de vazamentos que utilizam a modelagem do sistema geralmente simulam o comportamento dinâmico

do escoamento e sua resposta aos fenômenos e procedimentos operacionais rotineiros do duto. Essas simulações são feitas para determinadas condições de escoamento como pressão e vazão, para características do fluido como a densidade e a viscosidade, para características do duto como o material e a espessura e também para as condições do ambiente externo como temperatura e pressão (AZEVEDO, 2009). Outro aspecto relevante é o nível de detalhamento do modelo já que nem sempre um nível maior de detalhe no modelo significará um aumento na concordância entre os dados simulados e os dados reais (GOODREAU; BACHMAN, 2000). Dessa maneira, o algoritmo de detecção de vazamentos comparará as variáveis que estão sendo monitoradas com os resultados da simulação dos casos de escoamento rotineiros. Caso haja divergência entre os valores apresentados um vazamento será anunciado.

2.1.2.3 Métodos Baseados em Análise Estatística

As abordagens estatísticas são capazes de manipular uma grande quantidade de dados de processo altamente correlacionados, tornando-se assim uma poderosa ferramenta na detecção de vazamentos.

Em condições normais de escoamento, as médias dos sinais monitorados, seja pressão ou vazão, tende a convergir para um valor, que corresponde à pressão ou vazão do duto em regime estacionário. Durante o transitório de um vazamento, o valor médio do sinal se altera e o desvio padrão das amostras passa a ser significativo, indicando que houve uma alteração no regime de escoamento. Após a estabilização do vazamento, o sinal passa a apresentar um novo patamar de médias móveis e o desvio padrão volta a diminuir sua magnitude. Essa dinâmica é explorada pelo algoritmo de detecção de vazamentos, que monitora os parâmetros estatísticos do sinal ao longo do tempo. A variação brusca da média e um aumento no desvio padrão são sinais indicativos da ocorrência de um vazamento (AZEVEDO, 2009).

Outra vantagem da análise estatística é sua maior facilidade de adaptação de um processo para outro. Enquanto metodologias construídas a partir de modelos fenomenológicos dependem fortemente das características do processo estudado, os modelos estatísticos podem ser facilmente adaptados para diferentes aplicações industriais. Assim, as ferramentas de detecção de falhas desenvolvidas para dutovias podem facilmente ser adaptadas para a operação em caldeiras ou reatores (VAZ JÚNIOR, 2010).

2.1.3 Métodos de hardware

Os sistemas de detecção por *hardware* envolvem a instalação, ao longo do duto, de equipamento especializado para a detecção de vazamentos. Eles utilizam diferentes dispositivos e instrumentos físicos de medição tais como sensores de pressão, temperatura, vazão de fluido, infravermelho e também sensores de vibração ou acústicos.

Um exemplo de utilização desse método é apresentado em BIMPAS *et al.*, 2010. Nesse trabalho os autores descrevem o uso de ondas de radar (GPR – *Ground Penetrating Radar*) na busca por vazamentos em redes subterrâneas de abastecimento de água. Assim, a análise do perfil de reflexão da onda gerada pelo radar é capaz de relevar a ocorrência ou não de um vazamento na rede subterrânea.

2.1.3.1 Sensor de Pressão

Os sensores de pressão são usados para detectar vazamentos usando os métodos de ondas de pressão negativa e de gradiente de pressão. Geralmente são usados transdutores piezoelétricos, que formam dipolo elétrico proporcional à deformação sofrida em seu material sólido, produzindo uma diferença de potencial entre seus eletrodos (BEZERRA, 2008).

A detecção do vazamento ocorre quando a média de um conjunto de pontos recentes e a de pontos antigos é significativamente menor uma em relação à outra baseando-se nas variâncias previamente calculadas. Outro fato relevante é que, qualquer outra ocorrência operacional, que leve à diminuição da pressão no duto, como abertura de válvulas, por exemplo, deve ser conhecida pelo sistema de detecção. Caso contrário, vários alarmes falsos de vazamentos serão realizados. Ressalta-se ainda, o fato de que um conjunto muito grande de dados de pressão pode levar a uma detecção demorada e, em contrapartida, um conjunto muito pequeno pode apresentar falsos alarmes devidos aos erros de medição da pressão (MARTINS, 2006).

2.1.3.2 Sensor de Vazão

Esse é um dos métodos mais utilizados, sendo limitado pela exatidão da medida do volume e das variações associadas a ela. O método essencialmente mede o volume que entra e subtrai o volume que sai do duto. Dessa maneira, caso haja a diferença entre os volumes

medidos, de 2% para líquidos e de 10% para gases, indica-se que um vazamento está ocorrendo.

É comum a ocorrência de falsos alarmes uma vez que a taxa de fluxo depende de parâmetros do fluido como a temperatura, pressão, densidade e viscosidade. As variações nos parâmetros podem ser corrigidas por medições regulares das variáveis ao longo da tubulação ou preditas por um algum modelo de cálculo (MACIAS, 2004).

2.1.3.3 Sensor Infravermelho

Alguns vazamentos podem ser detectados através da identificação de mudanças de temperatura nas redondezas dos dutos. ZHOU e ZENG, 2006 descrevem o emprego de câmeras de vídeo infravermelhas na detecção de vazamentos de vapores orgânicos provenientes de equipamentos industriais. Essas mudanças de temperatura são comuns em processos de vazamentos, de modo que a análise das imagens geradas pode ser uma alternativa economicamente favorável para a detecção de vazamentos.

Este método pode ser usado com patrulha em veículos, helicópteros ou sistemas portáteis, podendo cobrir vários quilômetros da tubulação em um dia (BEZERRA, 2008).

2.1.3.4 Sensor Acústico

Os métodos acústicos estão sendo utilizados de forma crescente para monitorar as condições das plantas químicas em operação. O princípio desse método é que as ondas acústicas podem viajar através de estruturas e fluidos até sensores remotos e eles possibilitam uma supervisão abrangente da planta assegurando sua integridade estrutural. O sucesso na supervisão depende da existência de bons sensores situados em locais apropriados e também de um sistema satisfatório de amplificação e gravação dos dados amostrados (MACLEOD *et al.*, 1991). A localização de onde ocorre o vazamento pode ser estimada através dos tempos de chegada dos sinais aos sensores.

O uso de sinais acústicos para detectar vazamentos possui muitas características atraentes. Primeiro, é fácil de coletar ondas acústicas de lugares inacessíveis em equipamentos. Em segundo lugar, o ruído acústico pode prover melhores informações do que as obtidos a partir de sensores mais comuns como de temperatura e de pressão (HSIUNC, 1996).

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. Técnicas de processamento de sinal incluindo a transformada wavelet, correlação cruzada e técnicas de filtragem foram aplicadas para obter o tempo de chegada para os vários modos do sinal.

SANDBERG *et al.*, 1989 apresenta a utilização de “pigs” de monitoramento acústico que detectam o vazamento através da energia acústica gerada pelo escape do fluido.

2.2 Comparação entre os Métodos de Detecção de Vazamentos

Cada um dos métodos anteriormente apresentados possui vantagens e desvantagens. A Tabela 2, elaborada por CIST e SCHUTZ (2001), compara esses diferentes métodos de detecção de vazamento. Nela são apresentados parâmetros como a sensibilidade do método, a funcionalidade diante mudanças operacionais, a taxa de alarmes falsos, qual a especialização necessária para a manutenção do sistema e o custo envolvido na implementação e operação do método.

Tabela 2 - Comparação entre os Métodos de Detecção de Vazamentos.

Método	Sensível aos Vazamentos	Funciona sob Mudanças Operacionais	Taxa de Alarme Falso	Especialização da Manutenção	Custo Total
Biológico	Sim	Sim	Baixa	Média	Alto
Varição Fluxo ou Pressão	Sim	Não	Alta	Baixa	Baixo
Modelagem do Sistema	Sim	Sim	Alta	Alta	Alto
Método Estatístico	Sim	Sim	Baixa	Média	Médio
Sensor Infravermelho	Sim	Sim	Média	Média	Alto
Sensor Acústico	Sim	Não	Alta	Média	Médio

Baseado nessa tabela nota-se que a taxa de alarmes falsos é um problema bastante comum em todos os métodos de detecção de vazamentos e a maioria deles não atende bem a todos os fatores de desempenho. Na prática, o desempenho de cada método varia, dependendo das condições de operação, projeto da tubulação e da qualidade disponível da instrumentação do sistema. Geralmente, para

sistemas dutoviários complexos mais de um método de detecção é utilizado.

2.3 Histórico de Pesquisas no Laboratório de Controle de Processos (LCP)

Há alguns anos o LCP desenvolve projetos de pesquisa em parceria com a PETROBRAS e ANP visando ao desenvolvimento de tecnologias para o transporte e a detecção de vazamentos em dutos que transportam petróleo e seus derivados.

BRANDOLT 2002 desenvolveu um modelo linear de primeira ordem capaz de representar o comportamento dinâmico da pressão em um duto. Esse modelo representava os transientes a que um duto está exposto como a parada e partida e bomba e aberturas e fechamentos de válvulas.

BARAÑANO 2001 implementou um projeto que visava encontrar o comportamento da pressão em um duto com vazamento. A partir do monitoramento de um único ponto de pressão, caracterizou-se o efeito de vazamentos simulados em várias posições ao longo do duto. Foram escolhidos três fluidos diferentes para as simulações; são eles óleo diesel, gasolina e GLP. Com isso, foi possível obter curvas relacionando a queda de pressão e o tempo para os três fluidos e as vazões utilizadas bem como as curvas de aproximação. Esse comportamento foi caracterizado através de análise qualitativa, cálculos do ganho e constantes de tempo durante o evento de vazamento. Assim no final da pesquisa foi possível observar grande semelhança e proporcionalidade nas assinaturas de pressão para os três fluidos utilizados.

Já em 2006, BARAÑANO desenvolveu um trabalho para estimar indiretamente a vazão de escoamento em tubulações, tanto em estado estacionário quanto em transientes. Isso foi possível utilizando-se um observador de estados. Esse observador utilizava informações de abertura de válvula e as pressões à montante ou à jusante desta. Dessa maneira era possível ter disponível medidas de vazão sem a necessidade da instalação física do medidor.

O primeiro trabalho relacionado à detecção de vazamento utilizando-se sensores acústicos no LCP foi realizado por GARCIA, 2010. Nele, foram analisados sinais de vibração obtidos de um acelerômetro piezoelétrico sob diferentes condições operacionais de vazamento de ar comprimido, água e óleo de soja. Além disso, foram analisadas vibrações produzidas em situações de não vazamento na seção de duto. Foi possível localizar para os ensaios de vazamento, picos característicos da despressurização no espectro de frequências obtido pela Transformada Discreta de Fourier (TDF) aplicada ao sinal gerado para os três fluidos utilizados. Esses picos não eram observados nos experimentos de situações de não vazamento. Ressalta-se, porém, as seguintes dificuldades encontradas por ela em seu trabalho:

- Frequências características dos vazamentos eram altas e estavam acima do ponto de ressonância do acelerômetro e, portanto, as respostas dele eram não lineares.
- Ocorria uma forte atenuação do sinal já que as frequências obtidas eram altas.
- Equipamentos eram importados e de alto custo.
- Tanto o cabeamento utilizado quanto o acelerômetro exigiam extrema cautela ao serem manuseados o que dificultaria a utilização em campo da técnica proposta.

Este trabalho foi proposto para dar continuidade a essa linha de pesquisa e o sensor utilizado será um microfone de baixo custo o qual opera em uma faixa de frequência de 20 a 20000 Hz, menor que a utilizada por GARCIA, 2010.

2.4 Digitalização e Tratamento de Sinais

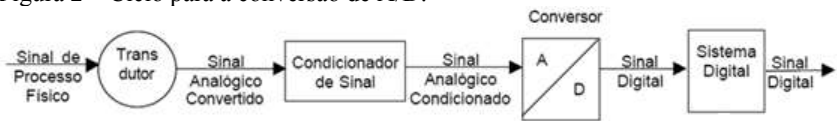
Os sinais são a descrição quantitativa de um determinado fenômeno, associado a um dado meio. Eles podem ser expressos na forma analógica ou na digital. Um sinal digital caracteriza-se por apresentar amplitudes dentro de um conjunto de valores finitos que variam de forma discreta com o tempo (HAYKIN, 2004).

Geralmente quando se realiza medições de temperatura, pressão, velocidade e tensão, por exemplo, os dados obtidos encontram-se no formato analógico e para obtê-los em forma digital, é necessário um conversor analógico-digital. Já para a realização da operação inversa, necessita-se de um conversor digital-analógico. Conversores

analógico/digital e digital/ analógico tornaram o mundo digital aberto para os diversos tipos de aplicações onde é vantajoso representar um sinal analógico em um formato digital (HAYKIN, 2004). Os equipamentos digitais apresentam maior flexibilidade, pois alterações no sistema podem ser feitas com simples atualizações de *software*, sem a necessidade de modificações no hardware e por essa razão são os mais utilizados atualmente (DA ROCHA, *et al.*, 2008).

Para a conversão de um analógico para o formato digital são adotadas as etapas mostradas na Figura 2.

Figura 2 – Ciclo para a conversão de A/D.



- **Primeira Etapa:** inicialmente, há a conversão do sinal proveniente do processo físico, através da passagem por um Transdutor (equipamento que converte grandezas físicas em sinais elétricos e vice-versa), criando o sinal analógico convertido.
- **Segunda Etapa:** caso seja necessário, será realizado o condicionamento desse sinal por meio de um Condicionador de Sinal. Nesse processo, geralmente são implementadas operações como a amplificação e a filtragem analógica do sinal.
- **Terceira Etapa:** ocorre a conversão do sinal por um Conversor A/D.
- **Quarta Etapa:** ocorre o processamento do sinal pelo Sistema Digital. Como exemplos de elementos de processamento de sinal digital têm-se os microprocessadores e os microcontroladores. A digitalização é subdividida em duas etapas: a discretização de amplitude, denominada “quantização” e a discretização temporal, denominada “amostragem”.

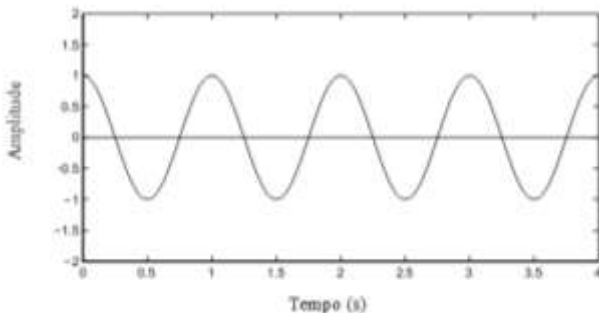
2.4.1 Teorema de Nyquist

O teorema de Nyquist ou Teorema da Amostragem pressupõe que ao amostrarmos um sinal contínuo de frequência máxima w_m , a uma taxa de amostragem maior ou igual a duas vezes w_m o sinal

amostrado conterá toda a informação do sinal contínuo e dessa maneira será possível obter exatamente o sinal original a partir dessas amostras.

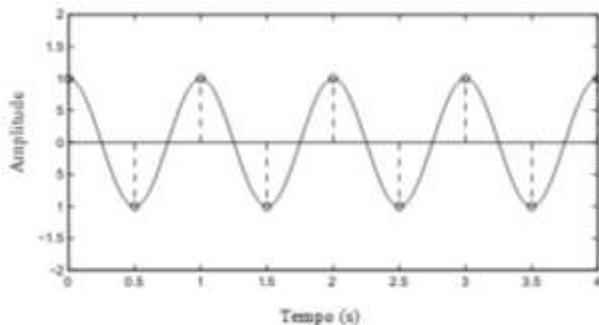
Para exemplificar, tem-se um sinal original formado por uma senoíde de frequência de 1 Hz, conforme a Figura 3.

Figura 3 – Sinal de uma senoíde de frequência de 1 Hz.



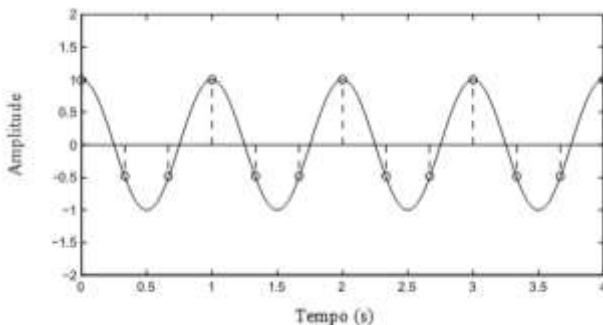
Caso a frequência de amostragem seja exatamente igual a 2 Hz, obedecendo ao exigido pelo Teorema de Nyquist, ela será suficiente para capturar cada pico e vale do sinal original. Isso está demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Sinal resultante com a frequência de amostragem de 2 Hz.



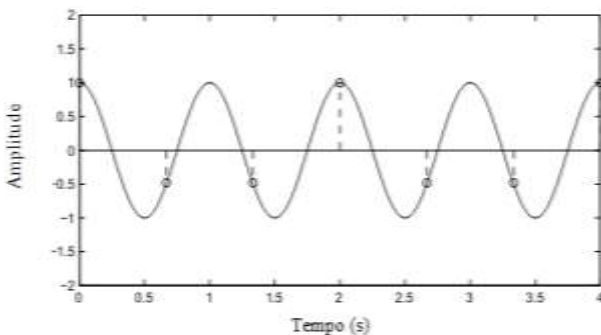
Já, se a frequência de amostragem for superior a 2 Hz, por exemplo 3 Hz, haverá amostras suficientes para melhor capturar as variações no sinal o que pode ser notado na Figura 5.

Figura 5 – Sinal resultante com a frequência de amostragem de 3 Hz.



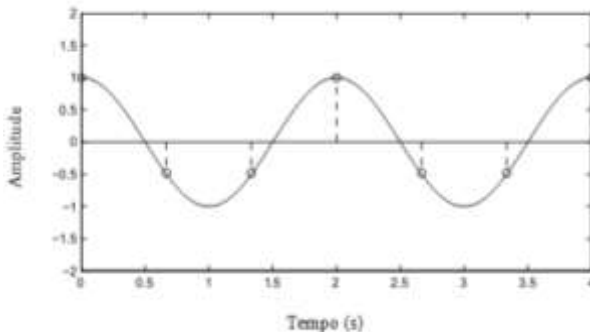
Porém, se a frequência de amostragem for de 1,5 Hz não será possível capturar de maneira adequada os picos e vales do sinal (Figura 6).

Figura 6 – Sinal resultante com a frequência de amostragem de 1,5 Hz.



Vale notar que no caso da frequência de amostragem ser de 1,5 Hz não se está apenas perdendo informações. Na verdade, ocorre a transmissão errada de informações sobre o sinal estudado. Em consequência disso, caso o operador desconheça totalmente o sinal original, ele será induzido a concluir que o sinal teria a forma da Figura 7.

Figura 7 – Sinal final obtido com a taxa de amostragem de 1,5 HZ.



Essa superposição nas réplicas deslocadas do espectro original é denominada *aliasing*, que se refere ao fenômeno de um componente de alta frequência assumir a identidade de um de baixa frequência, distorcendo o espectro do sinal de tempo contínuo original (HAYKIN, 2004).

2.4.2 Quantização

O processo de quantização consiste, em suma, consiste em atribuir um determinado número de níveis discretos em amplitude. Enquanto a amostragem é uma discretização da escala de tempo, a quantização (ou *bit rate*) é a discretização feita na escala de tensão do sinal (HAYKIN, 2004).

O número de níveis de tensão é obtido fazendo-se 2^n no qual n é o número de *bits* utilizado. Assim, se o número de *bits* de um sinal quantizado for igual a 8, o sinal terá 256 níveis. Supondo-se que esses valores são limitados entre 0 e 255 Volts. Um pulso qualquer poderá ter como valor real 147,39 V, mas terá de ser quantizado como sendo 147 V ou 148 V, pois não será possível representar 147,39 com apenas 8 *bits*. Por conseguinte haverá o chamado erro de quantização o qual nesse caso será de -0,39 V ou +0,61 V respectivamente. Essa falta ou excesso no valor do sinal provoca o surgimento de um sinal aleatório, denominado ruído de quantização. Para minimizar o erro de quantização, dado pela diferença entre a entrada não quantizada e a saída quantizada, é necessário buscar o melhor método de quantização, o que depende do sinal que está sendo considerado (FERNANDES, 2009).

2.4.3 Transformada de Fourier

Neste item do capítulo, serão apresentados alguns conceitos fundamentais relativos à Transformada de Fourier (FT). Tendo em vista o objetivo desse trabalho, que é realizar aplicações específicas desse conceito, não serão abordados completamente todos os aspectos dessa teoria.

Uma das principais técnicas na área de processamento de sinais é feita através da Transformada de Fourier a qual foi desenvolvida por Jean-Baptiste-Joseph Fourier (1768-1830). Essa técnica tem como fundamento o fato de que qualquer sinal periódico pode ser descrito como a soma de diversos sinais senoidais (ROCHA, *et al.*, 2011).

A Transformada de Fourier de um sinal $x(t)$ é definida como a distribuição complexa $X(w)$ tal que:

$$X(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{iwt} dt \quad (4)$$

Devido à conotação de $X(w)$ informar quais são as frequências que existem no sinal $x(t)$, costuma-se denominar $X(w)$ como o espectro de frequências do sinal $x(t)$.

A Transformada de Fourier do sinal $x(t)$, de domínio temporal, passa para o domínio de frequência e a operação inversa também pode ser realizada, conforme a equação 5.

$$\begin{aligned} X(w) = \mathcal{F}(x(t)) &\leftrightarrow x(t) \\ &= \mathcal{F}^{-1}(X(w)) \end{aligned} \quad (5)$$

O sinal $x(t)$ deverá, necessariamente, satisfazer às três Condições de Dirichlet para que haja a convergência da Transformada de Fourier:

- $\int_T |x(t)| dt < \infty \forall T$, ou seja, o sinal $x(t)$ é absolutamente integrável em um período T.
- O sinal $x(t)$ possui um número finito de mínimos e máximos em todo intervalo T;
- O sinal $x(t)$ possui um número finito de descontinuidades em todo intervalo T.

Os sinais físicos estudados neste trabalho necessariamente atendem a tais condições. Uma vez que aqueles que não as satisfazem

não podem ser empiricamente produzidos porque, por exemplo, teriam energia infinita, o que é fisicamente impossível (TAKAHASHI, 2002).

Há diferenças fundamentais entre o que é possível calcular a respeito de um sinal, quando se dispõe de sua fórmula analítica e aquilo que se pode calcular quando apenas se possuem medidas físicas, sem qualquer informação a respeito de sua estrutura analítica. A obtenção de uma aproximação para a Transformada de Fourier deve ser feita por processos de cálculos numéricos e deve ter representação numérica. Isso significa dizer que não é possível reter todos os infinitos valores que um sinal assume num intervalo de tempo, mas apenas um número finito de amostras dentro desse intervalo devido à finitude de memória disponível para armazenar esses valores. Essas limitações determinam a estrutura da aproximação que é possível construir para a Transformada de Fourier de um sinal. Essa aproximação será denominada de Transformada Discreta de Fourier (DFT) (TAKAHASHI, 2002).

Considerando uma sequência $x[k]$ cujo período é N , para todo valor de k tem-se:

$$x[k] = x(t_0 + kT) \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (6)$$

Os valores $x[k]$ correspondem aos valores do sinal contínuo $x(t)$ nos instantes correspondentes à amostragem, e fisicamente correspondem aos valores obtidos na saída do conversor analógico-digital. A Transformada Discreta de Fourier de $X[k]$ está representada na equação 7:

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-ik\frac{2\pi n}{N}} \quad (7)$$

Dessa maneira, TAKAHASHI, 2002 concluiu que a sequência $X[k]$ corresponde aos coeficientes de Fourier do sinal amostrado $x_s(t)$. Ele ainda observa que, entretanto, caso fosse necessário calcular a transformada de Fourier do sinal contínuo $x(t)$, esta seria simplesmente igual ao espectro de $x_s(t)$ no intervalo de frequências de zero a ω_m e igual a zero no restante do eixo positivo de frequências. Consequentemente, a Transformada Discreta de Fourier pode ser

interpretada como um mecanismo para o cálculo exato da Transformada de Fourier de sinais.

J.W. Cooley (IBM) em colaboração com J.W. Tukey (Bell Labs) conseguiram uma revolução maior no tratamento digital de sinais em 1965 com a publicação da Transformada Rápida de Fourier, a TRF. Ela é um método muito eficiente que reordena os cálculos dos coeficientes de uma Transformada Discreta de Fourier. Trata-se de um algoritmo, que realiza uma avaliação da TDF com o menor esforço computacional, ao invés de realizar o cálculo dela diretamente pela definição. A TRF é uma técnica que possibilita avaliar a TDF de forma mais rápida e econômica, sendo uma das maiores contribuições para a análise numérica já realizada (PUPIN, 2011).

A maior parte dos *softwares* comerciais como o MATLAB, MATHEMATICA e MATHCAD dispõem de rotinas para o cálculo da TRF a qual será utilizada neste trabalho.

CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo apresentará a descrição das bancadas experimentais e dos materiais utilizados além do detalhamento da metodologia empregada nos experimentos realizados para a execução deste trabalho.

3.1 Material

3.1.1 Bancada Experimental do Laboratório de Controle de Processos (LCP)

Na primeira etapa deste projeto, utilizou-se a bancada experimental de detecção de vazamentos do Laboratório de Controle de Processos (Figura 8) a qual também foi utilizada por GARCIA, 2010.

Essa bancada consiste de uma seção de duto feita de aço inox com 2 m de comprimento, 10 cm de diâmetro interno e com espessura da parede de 5,7 mm. Nela há a entrada de ar comprimido, o manômetro, o chanfro onde o microfone era fixado, o orifício de vazamento e as tampas de vedação. O duto era apoiado em dois cavaletes de madeira. A utilização desses cavaletes não interferiu nas frequências captadas. Isso porque as vibrações externas no ambiente de estudo são de baixa frequência, inferiores àquelas relacionadas aos vazamentos estudados. Julgou-se, portanto, desnecessário o isolamento do sistema de possíveis interferência. Esse fato será discutido no próximo capítulo nos ensaios de não vazamento.

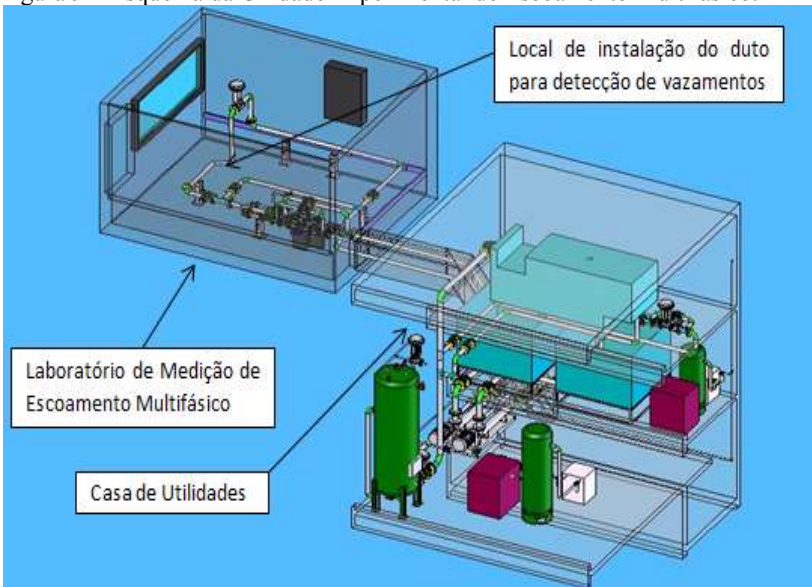
Figura 8 – Bancada experimental do LCP.



3.1.2 Unidade Experimental de Escoamento Multifásico (UEEM/DAS)

Na segunda etapa deste trabalho, utilizou-se a Unidade Experimental de Escoamento Multifásico (UEEM) do Departamento de Automação e Sistemas (DAS) da Universidade Federal de Santa Catarina. A Figura 9 mostra um esquema da UEEM. A unidade é composta pela casa de utilidades, onde ficam os equipamentos (bombas, compressores, separadores), e o Laboratório de Medição de Escoamento Multifásico, onde ocorrem as medições de vazão das fases individuais e do escoamento multifásico. O objetivo desta unidade é o desenvolvimento de soluções de baixo custo para medição multifásica, através da realização de escoamentos multifásicos, pesquisas de medição, controle e instrumentação.

Figura 9 – Esquema da Unidade Experimental de Escoamento Multifásico.

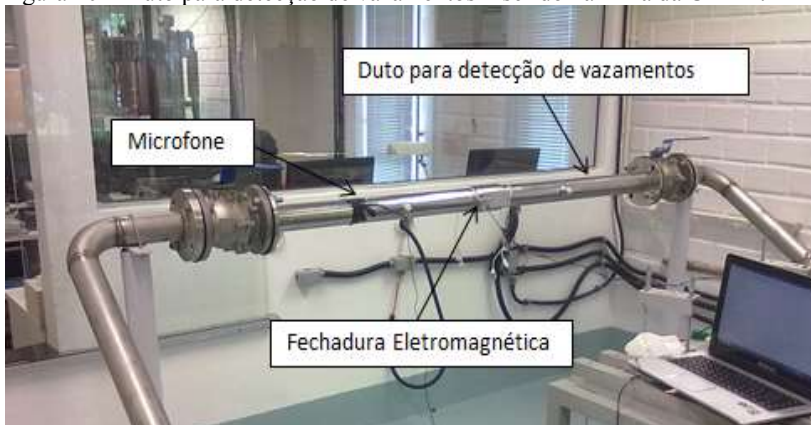


Fonte: SCUSSIATO, 2010.

A utilização desta unidade permitiu a integração dos projetos do PRH34. Isso porque foi projetado um duto flangeado (com 1,70 m de comprimento e diâmetro interno de 5 cm) semelhante ao da bancada do LCP o qual pôde ser inserido na linha da UEEM e, então, além dos

estudos em relação ao escoamento multifásico foi possível realizar estudos de detecção de vazamentos. Na Figura 10, apresenta-se a instalação do duto para detecção de vazamentos ligado à linha de escoamento da UEEM.

Figura 10 – Duto para detecção de vazamentos inserido na linha da UEEM.



3.1.3 Equipamentos Utilizados nos Experimentos

3.1.3.1 Microfone

Neste trabalho optou-se por utilizar um sensor acústico de baixo custo. O microfone empregado em todos os experimentos foi da marca Clone cuja faixa de medição era de 20 Hz a 20 kHz e o tempo de resposta de 0,15 s.

Para testar a confiabilidade das medidas de frequência realizadas por ele foram feitos alguns testes. Para isso, fixou-se o microfone na saída de áudio do computador e foram emitidas as frequências de 20, 200, 2000 e 20000 Hz. Nas Figuras 11, 12 e 13 estão apresentados os resultados para essas medidas. De maneira geral, é possível afirmar que o sistema conseguiu captar as frequências emitidas.

Figura 11 – Resposta do sistema para Frequência de 20 Hz.

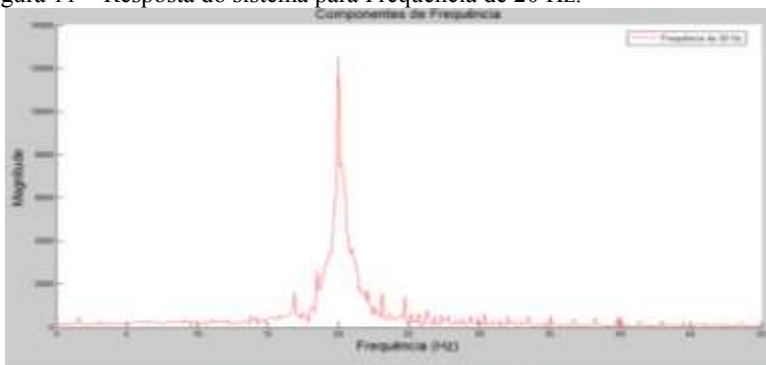
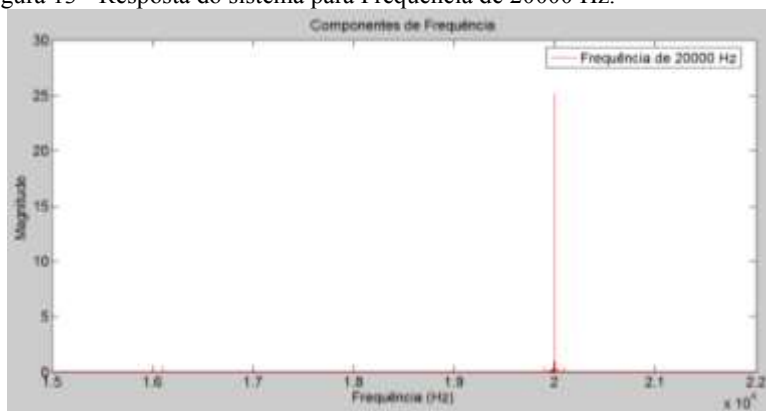


Figura 12 – Resposta do sistema para Frequência de 2000 Hz.

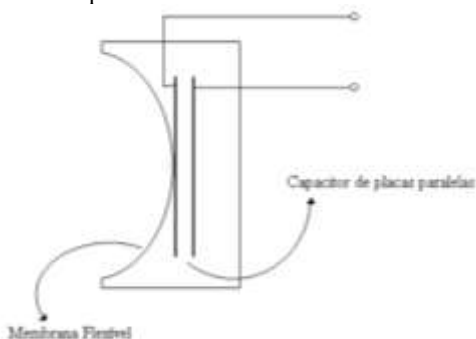


Figura 13 - Resposta do sistema para Frequência de 20000 Hz.



Além dos testes de confiabilidade, é necessário salientar o modo de funcionamento do sensor empregado. Em seu trabalho, TAKAHASHI, 2002 fez todo esse detalhamento e este trabalho utilizará essa abordagem. Na Figura 14 é mostrado o esquema de um microfone conforme o utilizado neste trabalho.

Figura 14 - Esquema de um microfone.



Fonte: TAKAHASHI, 2002

No microfone, há um capacitor de placas paralelas cuja carga é mantida aproximadamente constante. Uma das placas está presa na membrana flexível da entrada do microfone. Conseqüentemente, caso essa membrana venha a se mover, a placa também se moverá junto. Já a placa oposta está fixada no corpo do microfone.

O princípio de funcionamento baseia-se no fato de que quando o som atinge a membrana flexível, ele produz uma força causada pela diferença da pressão do ar. Isso faz a membrana flexível vibrar. Através da Equação 8 é possível notar que o deslocamento da membrana é proporcional à diferença de pressão.

$$\Delta_x(t) = K_m \Delta_p(t) \quad (8)$$

onde:

- $\Delta_p(t)$ corresponde ao próprio sinal sonoro;
- K_m é a constante de proporcionalidade que corresponde a uma constante de mola da membrana flexível;
- $\Delta_x(t)$ corresponde à variação da posição da placa móvel do capacitor, em relação a sua posição de repouso, ao longo do tempo.

Na medida em que o som passa pela membrana flexível as placas do capacitor passam a se aproximar e afastar mutuamente. Assim a expressão da distância entre as placas torna-se:

$$d(t) = d_0 + \Delta_x(t) \quad (9)$$

onde:

d_0 corresponde à distância existente entre as placas quando o sistema está em repouso.

Aplicando a Equação 8 na Equação 9 obtém-se:

$$d(t) = d_0 + K_m \Delta_p(t) \quad (10)$$

O valor da capacitância $C(t)$ do capacitor é uma grandeza inversamente proporcional à distância entre as placas:

$$C(t) = \alpha \frac{1}{d(t)} \quad (11)$$

Conforme mencionado anteriormente, a carga no capacitor é um valor constante, e a tensão entre seus terminais obedece à Equação 12:

$$Q = C(t)v(t) \quad (12)$$

Aplicando a Equação 11 na Equação 12 tem-se:

$$v(t) = \frac{Q}{\alpha} d(t) \quad (13)$$

Aplicando a Equação 10 na Equação 13 obtém-se:

$$v(t) = \frac{Q}{\alpha} (d_0 + K_m \Delta_p(t)) \quad (14)$$

Rearranjando-se todos os termos constantes com o objetivo de realçar apenas os termos variáveis, obtém-se a Equação 15:

$$v(t) = \beta + \gamma \Delta_p(t) \quad (15)$$

Assim, fica evidente na Equação 15 que o microfone produz uma tensão diretamente proporcional ao sinal sonoro captado. Esses valores de tensão serão captados em função do tempo através do sistema de aquisição de dados. Com eles será possível a utilização da

Transformada Rápida de Fourier para a obtenção dos espectros dos sinais de vazamento.

3.1.3.2 Computador

O computador utilizado durante os experimentos deste trabalho possui o processador Intel Core i5 430M 2,26 GHz, disco rígido de 500 GB e 8 GB de memória RAM. A placa de som do computador possui a taxa de aquisição de 44,1 kHz, isso significa que podem ser captados 44100 dados em um segundo. De acordo o Teorema de Nyquist, essa taxa de aquisição é suficiente para cobrir a faixa de frequências captadas pelo microfone (20 – 20000 Hz). A aquisição dos dados dos sinais foi realizada com o auxílio de um programa desenvolvido no *software* MATLAB na versão 7.0.1.

3.1.3.3 Manômetro

Para o monitoramento e ajuste da pressão interna do duto utilizou-se um manômetro analógico (Figura 8) fabricado pela Record cuja faixa de indicação era de 0 a 28 kgf/cm².

3.1.3.4 Placas Utilizadas Para Simulações de Vazamento

Para simular as situações de vazamentos foram confeccionadas oito placas planas com orifícios circulares de diâmetros de 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm e duas fendas de 0,5 mm x 30 mm e 1 mm x 15 mm. Na Figura 15 a) são mostradas as placas utilizadas no LCP e em b) as da UEEM. Essas placas eram parafusadas sobre a abertura existente na parede da seção de duto (Figura 16) com o objetivo de se estudar quais seriam os efeitos do tipo e do tamanho do furo no sinal gerado pelo vazamento.

Figura 15 – Placas planas com orifícios circulares de diâmetros de 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm e fendas de 0,5 mm x 30 mm e 1 mm x 15 mm. Em a) estão as placas utilizadas no LCP e em b) as da UEEM.



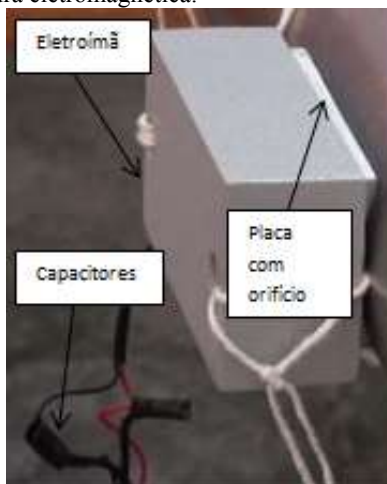
Figura 16 – Detalhe da abertura na parede da seção do duto.



3.1.3.5 Fechadura Eletromagnética

Em todos os experimentos realizados foi utilizada a fechadura eletromagnética (Figura 17) fabricada pela Automatiza – Sistemas de Segurança e Automação. Ela é composta por um eletroímã e uma placa metálica chamada blanche (neste trabalho a blanche foi substituída pela placa com orifício). O eletroímã possui um circuito de capacitores que evita o faiscamento do circuito de controle do eletroímã e também facilita a desmagnetização.

Figura 17 – Fechadura eletromagnética.



Conforme observado na Figura 17, a fechadura eletromagnética teve por objetivo vedar a placa com orifício existente na parede da seção de duto. Quando ela era desmagnetizada o vazamento era iniciado.

3.1.3.6 Compressor

O compressor utilizado foi da marca Schulz cuja capacidade máxima de trabalho era de $13,5 \text{ kgf/cm}^2$. Era ele quem fornecia o ar comprimido utilizado nos experimentos.

3.1.3.7 Peneira de Separação de Sólidos

Utilizou-se um agitador de peneira para serem adquiridos os sinais de vibração gerados por ele. Esses sinais foram comparados com as situações de vazamento.

3.2 Metodologia dos Experimentos

3.2.1 Ensaios na Bancada Experimental do LCP

Os ensaios realizados no Laboratório de Controle de Processos foram divididos em três etapas. Na primeira e na segunda etapa foram realizados ensaios de vazamento utilizando-se água e ar

respectivamente. Na terceira, foram realizados ensaios de não vazamento.

Em todos os ensaios da primeira e segunda etapas foram utilizadas as placas planas, mostradas na Figura 16-a), com os seguintes valores de pressão interna do duto, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de pressão utilizados para cada placa plana nos ensaios de vazamento da primeira e segunda etapa.

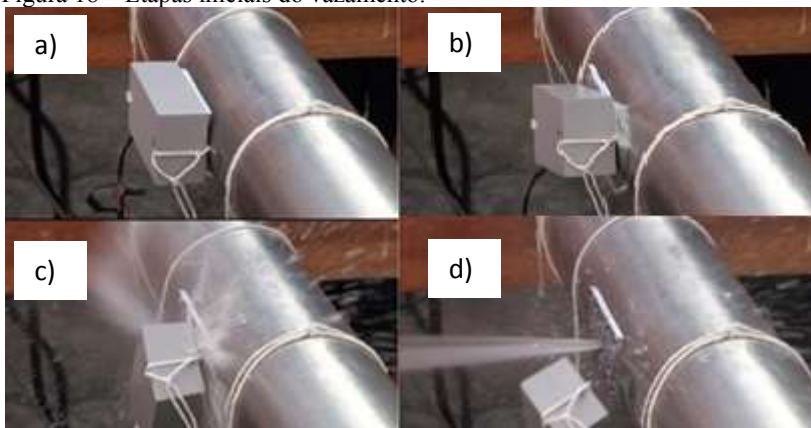
Diâmetro do orifício de vazamento (mm)	Pressão (Pa)
1	$1,96.10^5$
	$5,9.10^5$
2	$1,96.10^5$
	$5,9.10^5$
3	$1,96.10^5$
	$5,9.10^5$
4	$1,96.10^5$
	$5,9.10^5$
Fenda (0,5 x 30 mm)	$1,96.10^5$
	$5,9.10^5$

3.2.1.1 Primeira Etapa: Ensaios de Vazamentos de Água

Para a realização desses ensaios, a seção de duto era apoiada em dois cavaletes de madeira postados paralelamente (Figura 8). Então, era feita a seleção do orifício de vazamento o qual era parafusado ao duto. Para vedar esse orifício a fechadura eletromagnética era instalada. Fixava-se o microfone no duto a 50 cm de distância do orifício de vazamento. Uma das tampas de vedação era aberta e com o auxílio de uma mangueira o duto era totalmente preenchido com água. Novamente o duto era tampado e conectava-se a mangueira de ar comprimido na seção do duto para que a pressão interna do duto pudesse ser ajustada. Após essas etapas a aquisição de dados era iniciada e então a fechadura eletromagnética era desmagnetizada e o vazamento era iniciado.

Na Figura 18, é possível visualizar claramente as etapas iniciais do vazamento. Em a) há a fase de pré-vazamento na qual a aquisição de dados foi iniciada, porém sem a fechadura ser desmagnetizada. Em b) ocorre a desmagnetização da fechadura e em c) nota-se o início do vazamento e em d) há o vazamento da água sem a interferência da fechadura eletromagnética.

Figura 18 – Etapas iniciais do vazamento.



3.2.1.2 Segunda Etapa: Ensaios de Vazamentos de Ar

Os procedimentos empregados nos ensaios de vazamento de ar eram bastante semelhantes aos de água. Ocorre que quando o microfone era fixado ao duto, também a 50 cm do orifício de vazamento, conectava-se a mangueira de ar comprimido na seção do duto e então a pressão era ajustada. Feito isso, a aquisição de dados era iniciada e novamente a fechadura eletromagnética era desmagnetizada e, conseqüentemente, tinha-se o início do vazamento.

3.2.1.3 Terceira Etapa: Ensaios de Não Vazamento

Esses ensaios foram feitos para que fosse possível realizar a comparação dos espectros de frequências de situações de vazamento com as de não vazamento. Na Tabela 4 estão detalhados esses ensaios.

Tabela 4 – Descrição dos ensaios de não vazamento.

Situação de Não Vazamento	Descrição
Golpes	Desferiam-se golpes com objetos metálicos no duto e o sinal gerado era captado.
Compressor	Captava-se o sinal gerado pela partida do compressor.
Agitador de Peneiras	Captava-se o sinal gerado pelo agitador de peneiras.

3.2.2 Ensaios na Bancada Experimental da UEEM

Os ensaios realizados na Unidade Experimental de escoamento Multifásico foram divididos em três etapas. A primeira e a segunda etapa foram realizadas situações de vazamento utilizando-se água e ar respectivamente e na terceira foram realizadas situações de não vazamento.

3.2.2.1 Primeira Etapa: Ensaios de Vazamento de Água

Nesses ensaios a seção do duto era ligada ao circuito da UEEM de modo que o orifício de vazamento ficasse orientado para o chão. Essa medida foi adotada porque quando o vazamento era iniciado a água poderia molhar os sensores presentes na unidade. O microfone era fixado ao duto a 50 cm do orifício de vazamento e, então, a fechadura eletromagnética era ativada. Com isso era possível ativar a bomba da casa de utilidades para enviar a água para o circuito. A vazão era ajustada para $5 \text{ m}^3/\text{h}$ e a pressão era de $1,60 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Quando o escoamento atingia seu estado estacionário o sistema de aquisição de dados era acionado e então o vazamento tinha início. Foram feitos testes com as placas planas mostradas na Figura 15-b. Na Figura 19 é apresentado um dos ensaios de vazamento de água.

Figura 19 – Ensaio de vazamento de água.



3.2.2.2 Segunda Etapa: Ensaios de Vazamento de Ar

Nesses ensaios a seção do duto era ligada ao circuito da UEEM de modo que o orifício de vazamento ficasse orientado paralelamente ao chão conforme pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Configuração do sistema nos ensaios de vazamento de ar.



O microfone novamente era fixado ao duto a 50 cm do orifício de vazamento e, então, a fechadura eletromagnética era ativada. A vazão de ar também era ajustada para $5 \text{ m}^3/\text{h}$ e pressão de $1,60 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Novamente, quando o escoamento atingia seu estado estacionário o sistema de aquisição de dados era acionado e então o vazamento tinha início. Também foram realizados ensaios com todas as placas planas mostradas na Figura 15-b.

3.2.2.3 Terceira Etapa: Ensaios de Não Vazamento

Novamente esses ensaios foram realizados para a posterior análise dos espectros de frequências das situações de vazamento e das de não vazamento. Na Tabela 5 estão detalhados esses ensaios.

Tabela 5 - Descrição dos ensaios de não vazamento.

Situação de Não Vazamento	Descrição
Golpes no duto	Desferiam-se golpes com objetos metálicos no duto e o sinal gerado era captado.
Escoamento de fluido	Captava-se o sinal gerado pelo escoamento de ar tanto com o microfone fixo no duto quanto com ele a 50 cm do duto.
Abertura ou fechamento de válvula	Captava-se o sinal gerado pela abertura ou fechamento da válvula de admissão de ar na UEEM. Foram feitos testes com o microfone fixo no duto quanto com ele a 50 cm do duto.
Ruído da casa de utilidades	Captou-se o ruído presente na casa de utilidades quando estavam em operação os equipamentos como o compressor e a bomba.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados no Laboratório de Controle de Processos e na Unidade Experimental de Escoamento Multifásico.

4.1 Vazamentos de Água

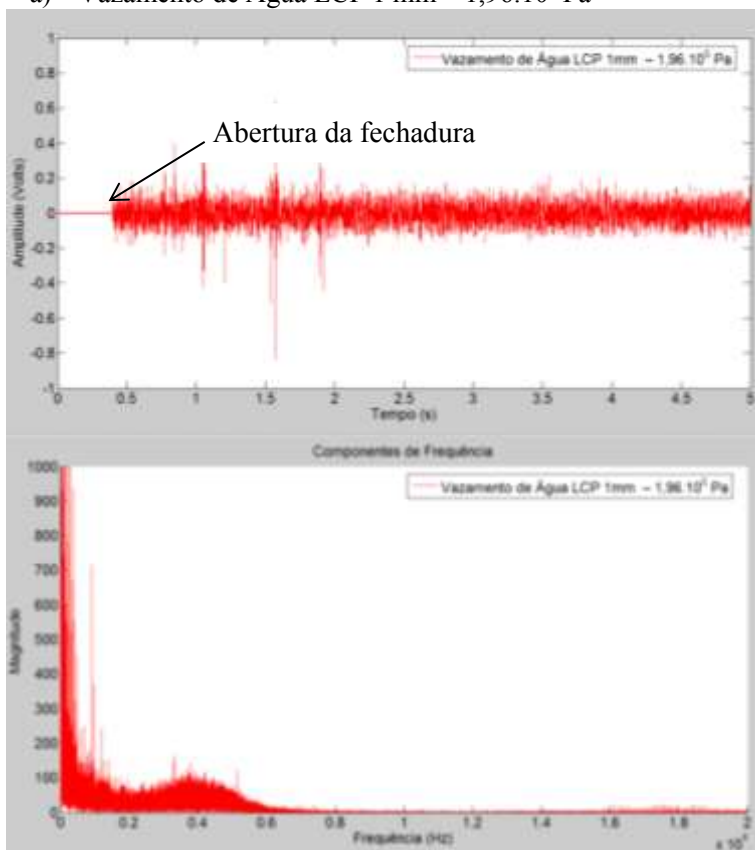
Os estudos realizados relativos aos vazamentos de água foram divididos em duas etapas. Na primeira realizada na bancada experimental do Laboratório de Controle de Processos utilizou-se de 5 orifícios de vazamento e dois níveis de pressão ($1,96 \cdot 10^5$ e $5,9 \cdot 10^5$ Pa).

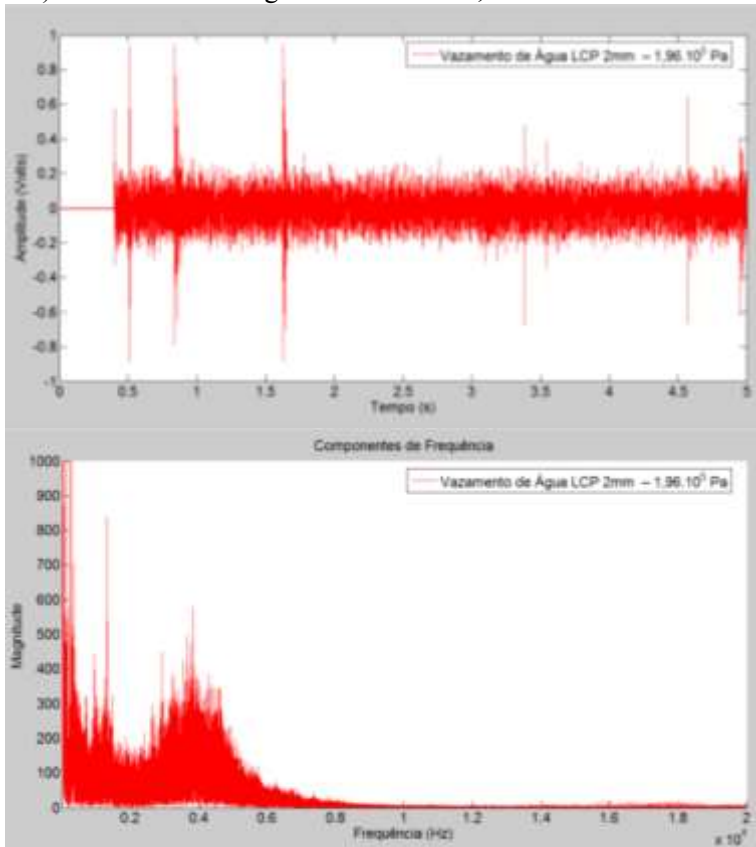
Já na segunda etapa, realizada na Unidade Experimental de Escoamento Multifásico, também foram utilizados 5 orifícios de vazamento com uma pressão média de $1,6 \cdot 10^5$ Pa. Essas duas etapas possibilitaram que a implementação da metodologia detalhada no capítulo anterior fosse testada em diferentes condições de operação.

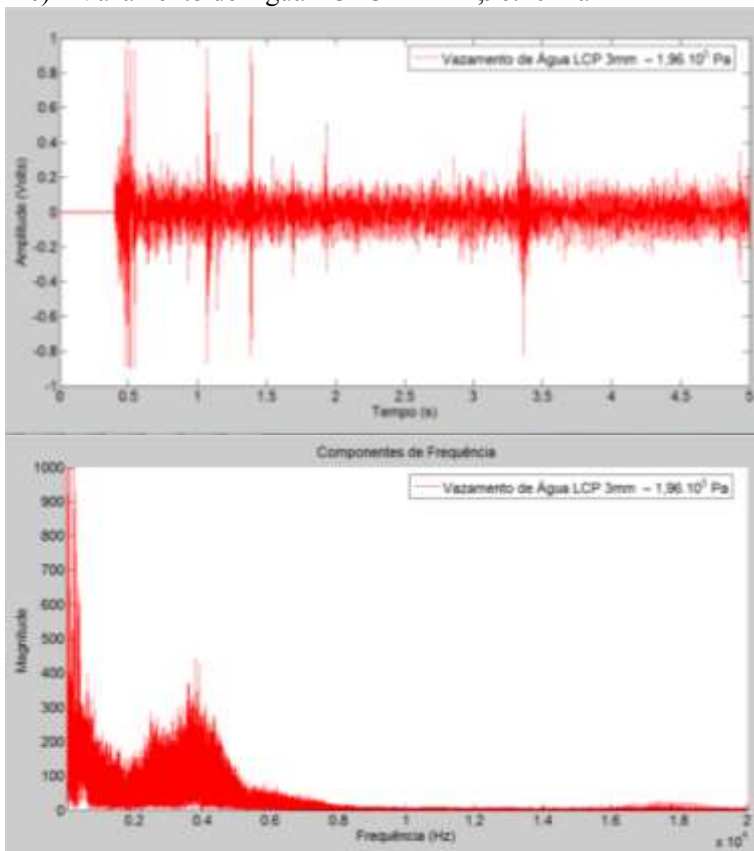
A Figura 21 apresenta os resultados obtidos para os vazamentos de água no LCP para cada orifício disponível (1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm e a fenda) com pressão interna do duto de $1,96 \cdot 10^5$ Pa. São apresentados os sinais dos vazamentos de água e os respectivos espectros de frequência obtidos utilizando-se a Transformada Discreta de Fourier.

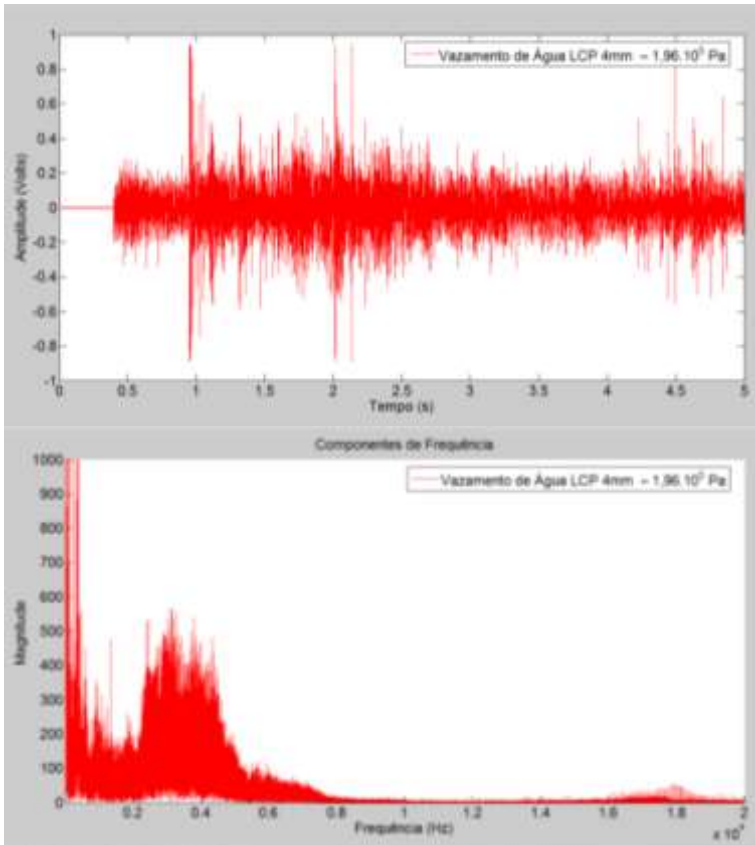
O início do vazamento é marcado pela abertura da fechadura eletromagnética. Esse fenômeno fica evidente nos gráficos dos sinais na Figura 21. Antes dele o microfone não capta nenhum sinal e quando ele se inicia há um pico nos valores de tensão (instante 0,4 s). Nota-se que a amplitude do sinal tende a diminuir nos primeiros instantes e então alcança a estabilidade. Essa pequena variação na amplitude do sinal indica que nos 5 segundos analisados a pressão interna do duto diminuiu lentamente. Em relação ao espectro de frequência é notável que, apesar de o sistema conseguir medir até 20 kHz, foram captadas frequências com amplitudes significativas apenas até 8 kHz. Vale ressaltar que as frequências presentes entre 16 e 19 kHz foram geradas devido a ruídos dos cabos utilizados nos experimentos. Assim que esses cabos foram substituídos essas frequências não voltaram a aparecer em outros experimentos.

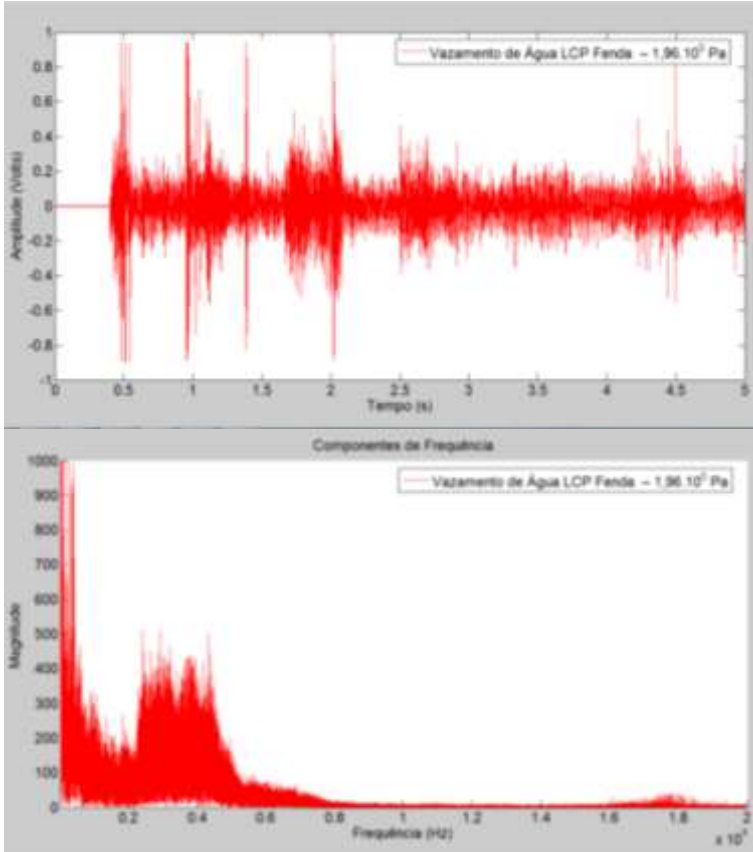
Figura 21 – Vazamentos de Água realizados no LCP: em a), b), c), d) e e) estão apresentados os sinais dos vazamentos (Amplitude x Tempo) e os respectivos espectros de frequência.

a) Vazamento de Água LCP 1 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa

b) Vazamento de Água LCP 2 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa

c) Vazamento de Água LCP 3 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pad) Vazamento de Água LCP 4 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa

d) Vazamento de Água LCP 4 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa

e) Vazamento de Água LCP Fenda – $1,96 \cdot 10^5$ Pa

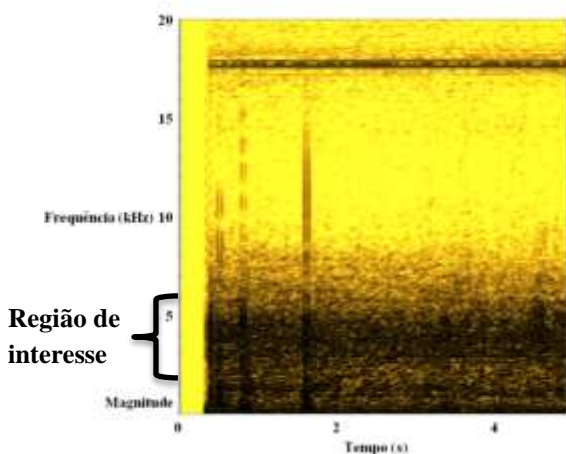
A Figura 22 mostra os espectros tempo-freqüência dos vazamentos de água com orifício de vazamento de 2 mm e da fenda com pressão interna do duto ajustada em $1,96 \cdot 10^5$ Pa. Em ambos os casos na vista superior há a presença de uma região mais escura no gráfico entre 2 e 6 kHz.

Devido ao fato de essa região estar presente durante todo o período do vazamento e ter se repetido em todos os experimentos realizados, considerou-se então que essa seria a região de interesse deste estudo.

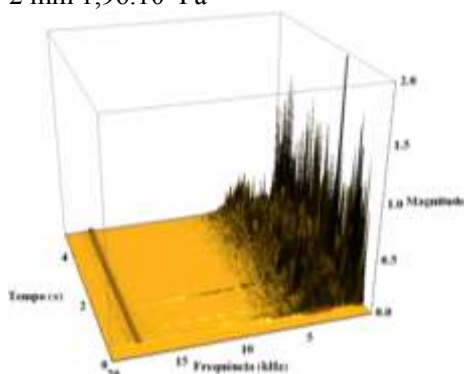
Observando-se a vista lateral do espectro em três dimensões fica mais evidente a natureza estacionária do sinal já que não há variações sensíveis nele ao longo do tempo, inclusive na região de interesse.

Figura 22 – Diagramas tempo-frequência do Vazamento de Água LCP – 2 mm $1,96.10^5$ Pa e do Vazamento de Água LCP - Fenda $1,96.10^5$ Pa.

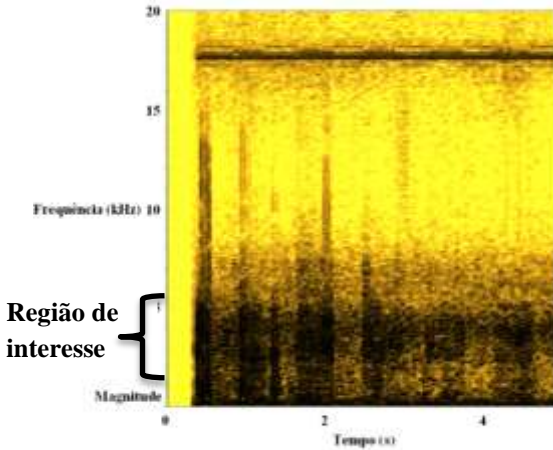
- a) Diagrama tempo-frequência do Vazamento de Água LCP – 2 mm $1,96.10^5$ Pa



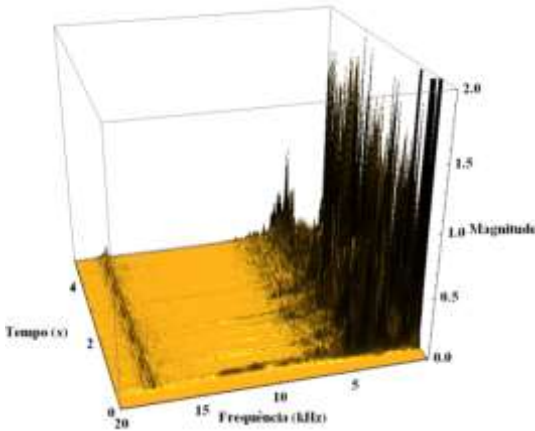
- b) Diagrama tempo-frequência em 3D do Vazamento de Água LCP – 2 mm $1,96.10^5$ Pa



- c) Diagrama tempo-frequência do Vazamento de Água LCP – Fenda $1,96.10^5$ Pa



d) Diagrama tempo-frequência em 3D do Vazamento de Água LCP – Fenda $1,96 \cdot 10^5$ Pa



Discriminada a região de interesse, é possível notar que ela se assemelha bastante com uma curva de Gauss. Esse tipo de abordagem é bastante recorrente.

Um exemplo é o trabalho de KOTANI, 2004 no qual dentro do algoritmo das redes neurais por ele utilizadas buscaram-se Gaussianas como o padrão de comportamento do vazamento. Essa curva é descrita pela Equação 16 :

$$f(x) = a_1 * \exp\left(-\left(\frac{x - b_1}{c_1}\right)^2\right) \quad (16)$$

na qual:

a_1 é a altura, ou o centro da Gaussiana;

b_1 é o valor médio dos dados;

c_1 é o desvio padrão dos dados.

Com o auxílio da *Toolbox Curve Fitting* do *software* MATLAB 7.0.1 foram ajustadas Gaussianas para cada caso de vazamento.

Na Tabela 6 são apresentados os valores das constantes das Gaussianas ajustadas.

Tabela 6 - Valores das constantes das Gaussianas ajustadas para Vazamento de Água a $1,96.10^5$ Pa.

	a_1	b_1	c_1	R^2
1 mm	75,55	3821	1308	0,8947
2 mm	209,3	3880	1301	0,9284
3 mm	141,7	3694	1304	0,9151
4 mm	235,1	3706	1145	0,8852
Fenda	299,5	3734	1132	0,9085

Avaliando-se os valores encontrados para a_1 o qual corresponderia ao valor da maior magnitude da curva, nota-se que:

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um aumento de 177% em relação ao valor de 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve um decréscimo de 32% em relação ao valor de 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve novamente um aumento de 67% em relação ao valor de 3 mm;
- o vazamento com a fenda foi o que obteve o maior valor para a magnitude.

Esses valores obtidos demonstram que o aumento do orifício de vazamento acarreta no aumento dos valores de magnitude alcançados.

Em relação a b_1 que corresponderia ao valor de frequência média, percebe-se que:

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um aumento de 59 Hz em relação ao valor de 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve um decréscimo de 186 Hz em relação ao valor de 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve novamente um aumento de 12 Hz em relação ao valor de 3 mm;
- o vazamento com a fenda foi superior em 28 Hz em relação ao valor de 4 mm.

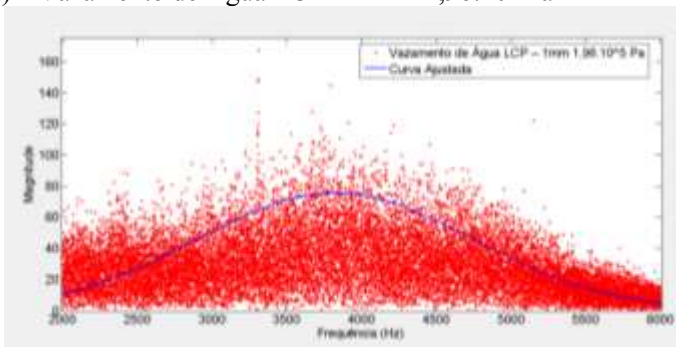
A tendência obtida foi que o aumento do diâmetro causou o deslocamento da frequência média para regiões de maiores frequências (1 mm para 2 mm). Porém, a partir do vazamento de 2 mm, mesmo com o aumento do orifício, as frequências médias obtidas possuíam valores inferiores em relação àquelas.

Já em relação a constante c_1 , a qual representa o grau de variação dos valores do conjunto, os valores em ordem crescente foram da fenda, 4 mm, 2 mm, 3 mm e 1 mm.

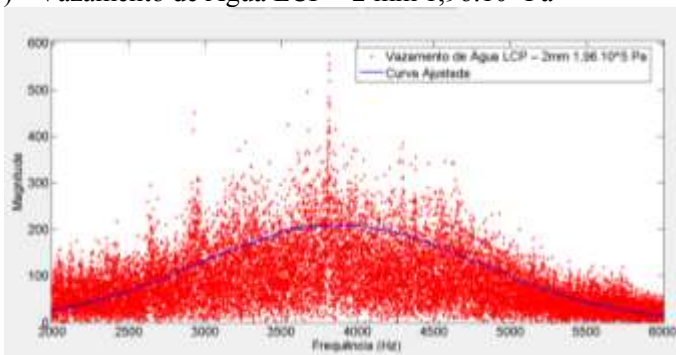
A Figura 23 apresenta as curvas ajustadas para os respectivos casos de vazamentos utilizando-se as constantes a_1 , b_1 e c_1 . Nota-se que para todos os casos de vazamento as gaussianas ajustadas conseguiram demonstrar satisfatoriamente o comportamento dos dados experimentais.

Figura 23 – Curvas ajustadas para os vazamentos de água no LCP com pressão interna do duto de $1,96.10^5$ Pa.

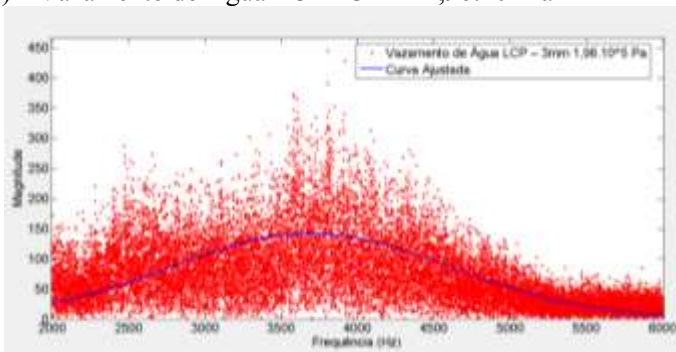
a) Vazamento de Água LCP – 1 mm $1,96.10^5$ Pa

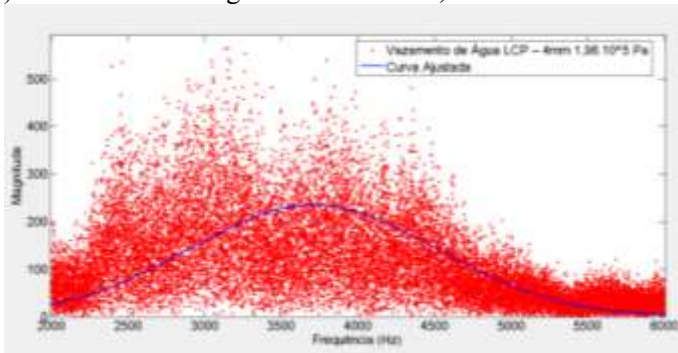
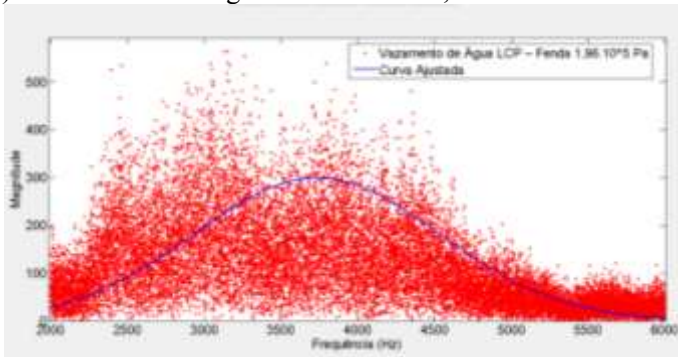


b) Vazamento de Água LCP – 2 mm $1,96.10^5$ Pa



c) Vazamento de Água LCP – 3 mm $1,96.10^5$ Pa

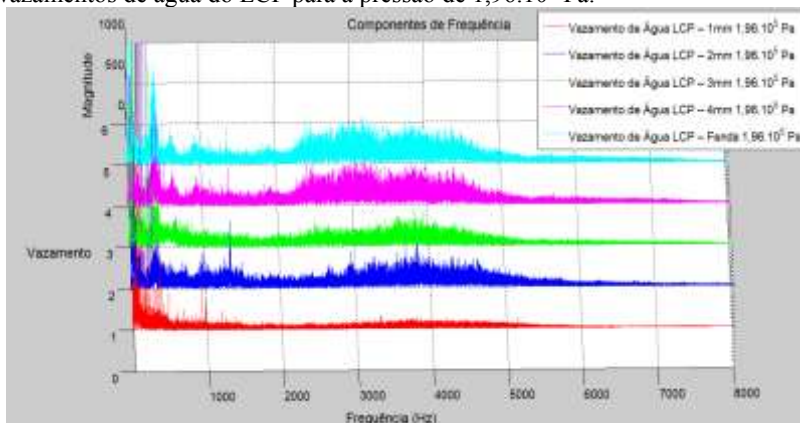


d) Vazamento de Água LCP – 4 mm $1,96.10^5$ Pae) Vazamento de Água LCP – Fenda $1,96.10^5$ Pa

A Figura 24 foi plotada para que fosse possível analisar simultaneamente todos os vazamentos para que ficassem mais evidentes as influências do aumento no diâmetro do orifício de vazamento e da utilização da fenda discutidas através das constantes apresentadas anteriormente.

Depreende-se então que a tendência geral foi que o aumento do orifício implica o aumento da frequência média a qual é acompanhada do aumento da magnitude do sinal.

Figura 24 – Influência do diâmetro do orifício de vazamento no espectro dos vazamentos de água do LCP para a pressão de $1,96 \cdot 10^5$ Pa.



Para testar a metodologia descrita no capítulo anterior foram estudados casos de vazamento de água no LCP com a pressão interna do duto ajustada em $5,9 \cdot 10^5$ Pa. O objetivo desses experimentos foi para a posterior análise da influência dos valores de pressão nos espectros gerados pelos vazamentos.

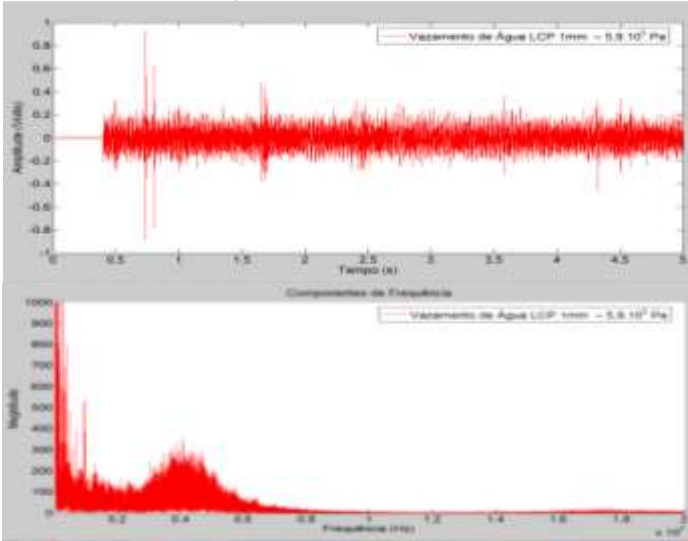
A Figura 25 mostra os sinais em função do tempo com os respectivos espectrogramas de frequências para cada um dos orifícios circulares de vazamentos (1 mm, 2 mm, 3 mm e 4 mm) e da fenda de 0,5 mm x 30 mm. Todos os vazamentos tiveram início aos 0,4 s quando ocorre o primeiro pico de tensão.

Pela análise dos sinais apresentados na Figura 25 nota-se claramente a influência do diâmetro do orifício de vazamento na amplitude do sinal. Por exemplo, as amplitudes nos instantes iniciais alcançadas no sinal do vazamento com orifício de 4 mm são muito superiores às amplitudes do vazamento de 1 mm. Essas diferenças serão analisadas nas próximas figuras.

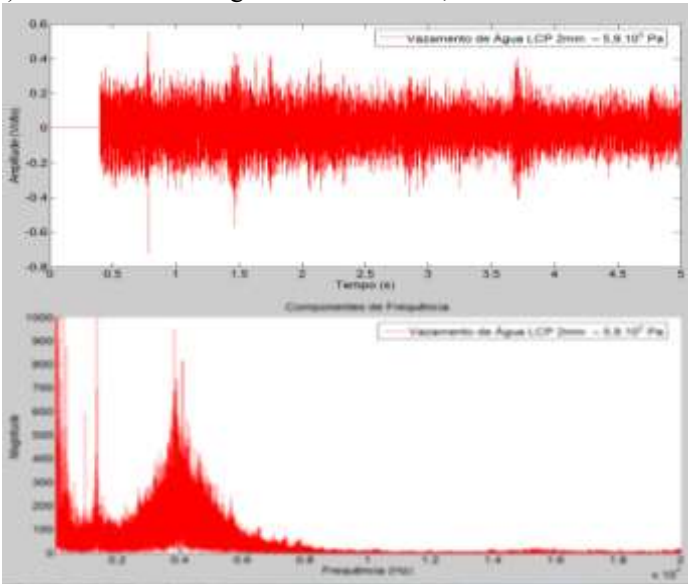
Novamente é possível perceber que embora o sistema de aquisição utilizado pudesse medir confiavelmente frequências até 20 kHz, a maior parte das frequências apresentadas restringiram-se a 8 kHz. Mais uma vez as frequências entre 16 e 19 kHz geradas por ruídos dos cabos aparecem nesses espectros.

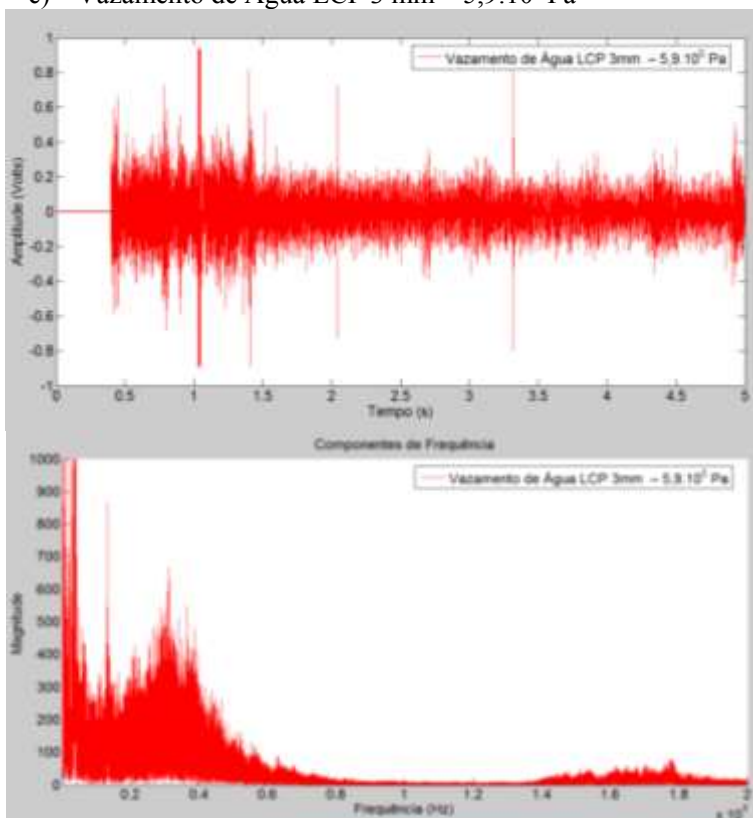
Figura 25 – Vazamentos de Água realizados no LCP: em a), b), c), d) e e) estão apresentados os sinais dos vazamentos (Amplitude x Tempo) e os respectivos espectros de frequência.

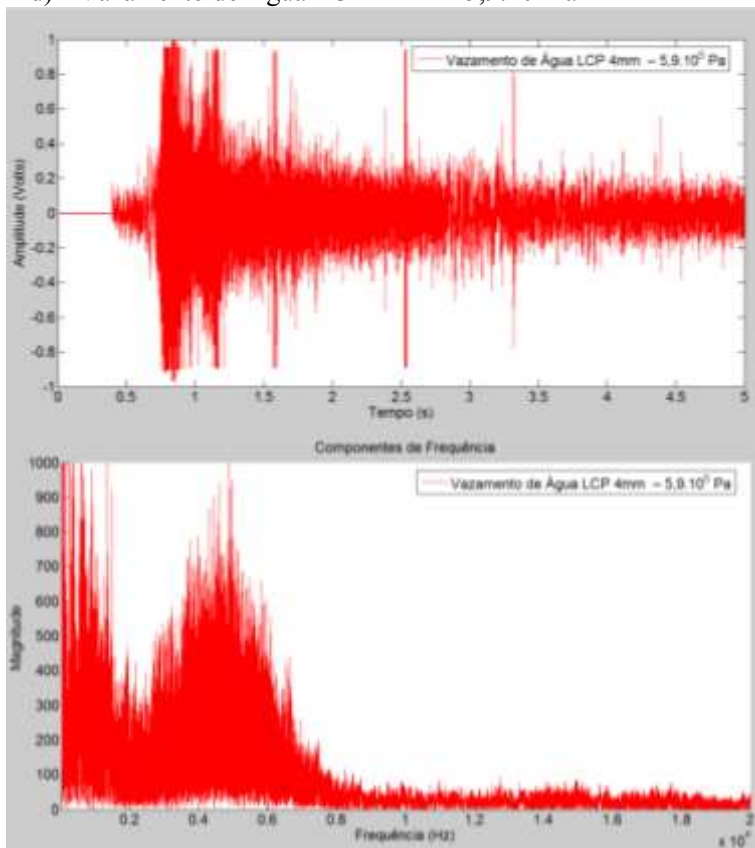
a) Vazamento de Água LCP 1 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa

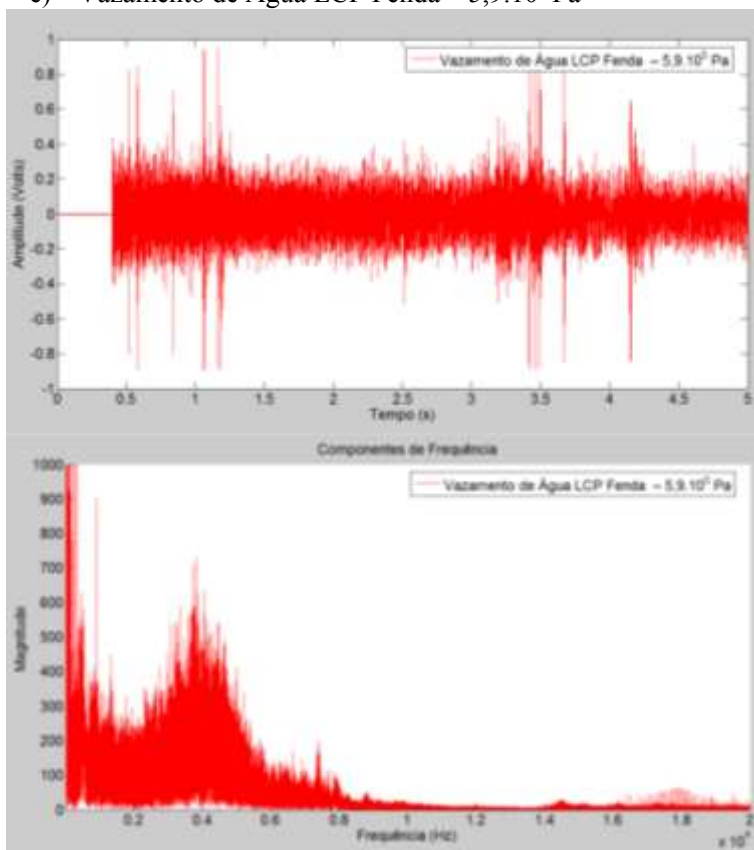


b) Vazamento de Água LCP 2 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa



c) Vazamento de Água LCP 3 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa

d) Vazamento de Água LCP 4 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa

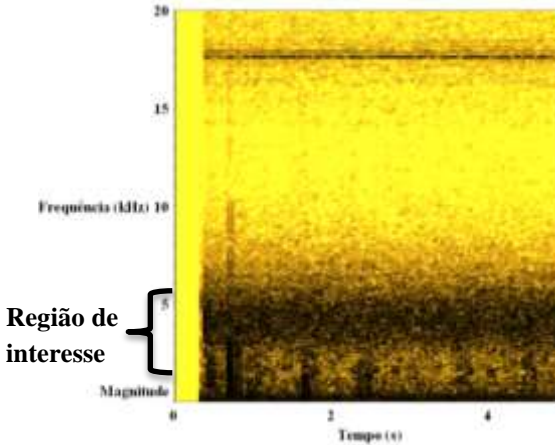
e) Vazamento de Água LCP Fenda – $5,9 \cdot 10^5$ Pa

Muito embora tenha sido feita a alteração no valor da pressão interna do duto a Figura 26 demonstra no espectro tempo-frequência dos vazamentos que novamente ocorre a presença de sinais na região de interesse entre 2 e 6 kHz.

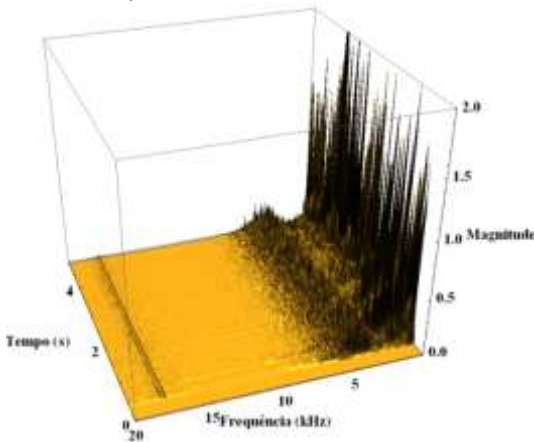
Esse fato é bastante relevante, já que a princípio o valor da pressão interna do duto não alteraria a região de frequências que caracterizariam o vazamento. Além disso, pela vista lateral do espectro em três dimensões nota-se que o sinal novamente é estacionário.

Figura 26 – Diagramas tempo-frequência do Vazamento de Água LCP – 1 mm $5,9.10^5$ Pa e do Vazamento de Água LCP - Fenda $5,9.10^5$ Pa.

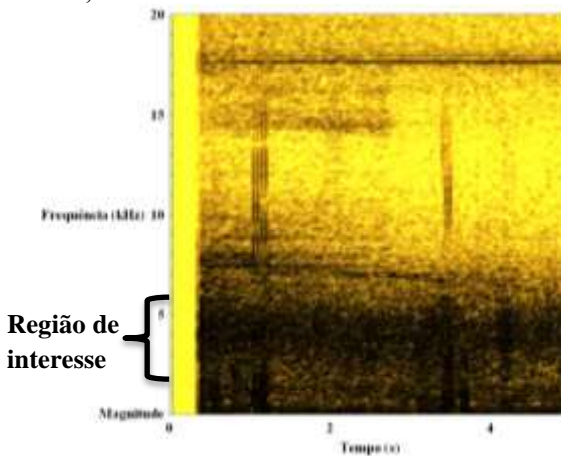
- a) Diagrama tempo-frequência do Vazamento de Água LCP – 1 mm $5,9.10^5$ Pa



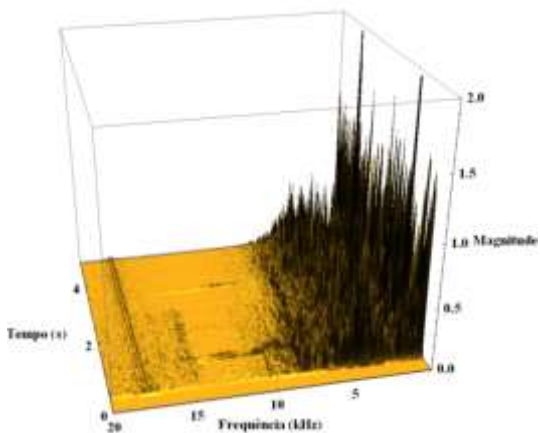
- b) Diagrama tempo-frequência em 3D do Vazamento de Água LCP – 1 mm $5,9.10^5$ Pa



- c) Diagrama tempo-frequência do Vazamento de Água LCP - Fenda $5,9 \cdot 10^5$ Pa



- d) Diagrama tempo-frequência em 3D do Vazamento de Água LCP - Fenda $5,9 \cdot 10^5$ Pa



Novamente foram ajustadas Gaussianas para essa região de interesse. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores das constantes das Gaussianas ajustadas para Vazamento de Água a $5,9 \cdot 10^5$ Pa.

	a_1	b_1	c_1	R^2
mm	145,6	4041	1185	0,9280
2 mm	291	4116	1176	0,9414
3 mm	268,6	3482	1106	0,8670
4 mm	453,3	4265	1209	0,8561
Fenda	306,4	3894	1195	0,9426

Avaliando-se os valores encontrados para a_1 , nota-se que:

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um aumento de 100% em relação ao valor de 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve uma diminuição de 8% em relação ao valor de 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um incremento de 69% em relação ao valor de 3 mm;
- o vazamento com a fenda obteve valor de 5% em relação ao valor de 2 mm;
- o vazamento com orifício de 4 mm foi o que obteve o maior valor de magnitude.

Com esses resultados, do mesmo modo que nos casos anteriores, conclui-se que o aumento do orifício acarreta no aumento dos valores de magnitude.

Em relação a b_1 :

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm os valores aumentaram em 75 Hz;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve uma diminuição considerável de 634 Hz;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um incremento de 783 Hz;
- o vazamento com a fenda obteve 147 Hz a menos que o de 1 mm;
- o vazamento com orifício de 4 mm foi o que obteve o maior valor para a frequência média.

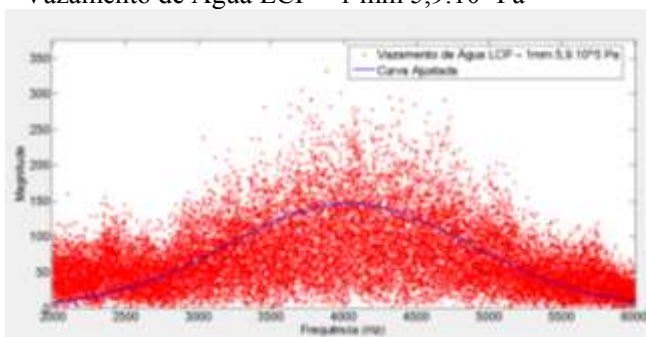
Mais uma vez, o aumento do diâmetro causou o deslocamento da frequência média para regiões com frequências maiores (1 mm para 2 mm). A partir do vazamento de 2 mm, mesmo com o aumento do orifício, as frequências médias obtidas tendem a valores inferiores em relação às anteriores.

Já em relação a constante c_1 (desvio-padrão) os valores em ordem crescente foram de 3 mm, 2 mm, 1mm, fenda e 4 mm.

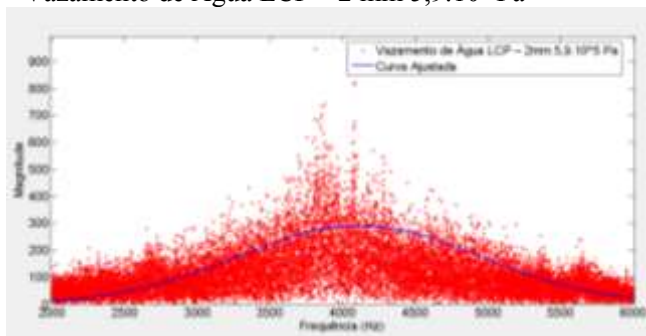
A Figura 27 apresenta as curvas ajustadas para os respectivos casos de vazamentos. Novamente elas seguiram de maneira satisfatória a tendência dos dados experimentais.

Figura 27 – Curvas ajustadas para os vazamentos de água no LCP com pressão interna do duto de $5,9 \cdot 10^5$ Pa.

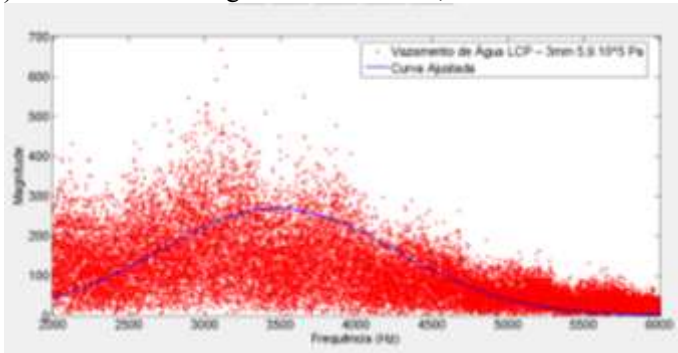
a) Vazamento de Água LCP – 1 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa



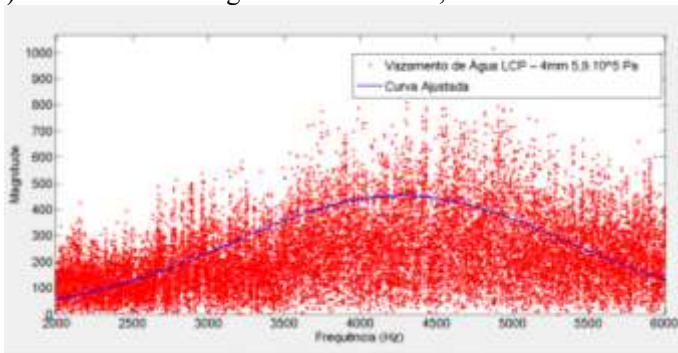
b) Vazamento de Água LCP – 2 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa



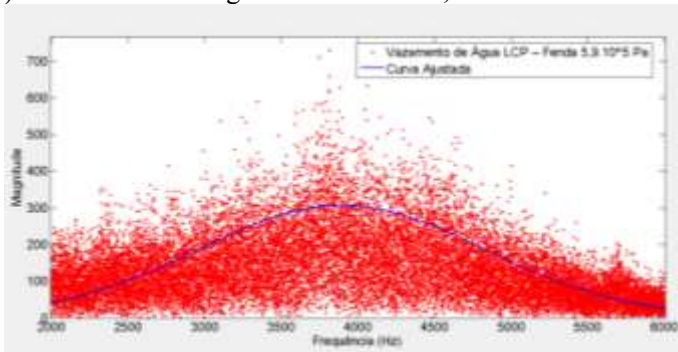
c) Vazamento de Água LCP – 3 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa



d) Vazamento de Água LCP – 4 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa

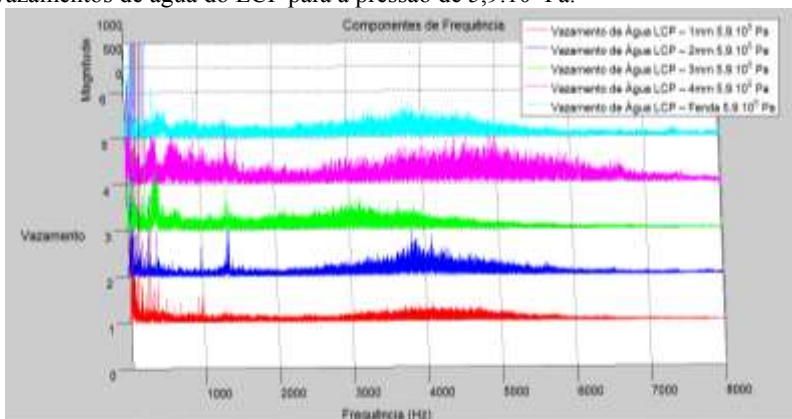


e) Vazamento de Água LCP – Fenda $5,9 \cdot 10^5$ Pa



Na Figura 28 são apresentados todos os casos de vazamento do LCP nos quais foi utilizada a pressão interna do duto de $5,9.10^5$ Pa. Através dela é possível observar as influências causadas pelo aumento no diâmetro do orifício de vazamento e na utilização da fenda. Infere-se que o comportamento alcançado foi o igual ao caso anterior utilizando-se a pressão interna de $1,96.10^5$ Pa.

Figura 28 – Influência do diâmetro do orifício de vazamento no espectro dos vazamentos de água do LCP para a pressão de $5,9.10^5$ Pa.



Com a realização dos experimentos anteriormente descritos foi possível analisar também a influência do acréscimo da pressão interna no duto. Da Figura 29 até a 33 são apresentados os comparativos de um vazamento com o mesmo orifício, porém, com diferentes pressões.

Figura 29 – Influência da pressão para vazamento de água com orifício de vazamento de 1 mm.

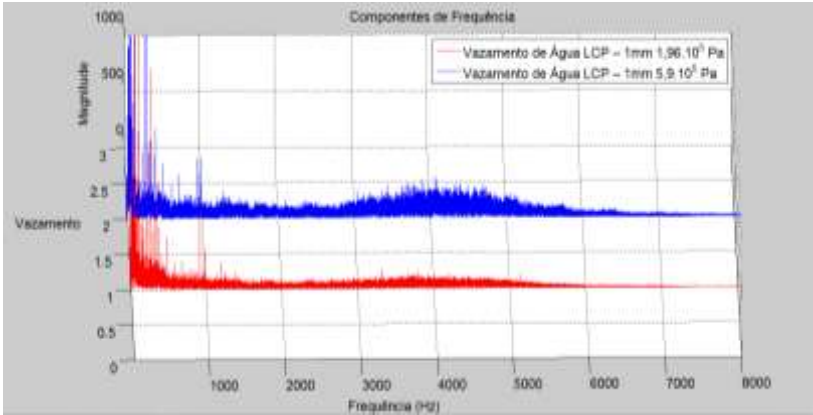


Figura 30 – Influência da pressão para vazamento de água com orifício de vazamento de 2 mm.

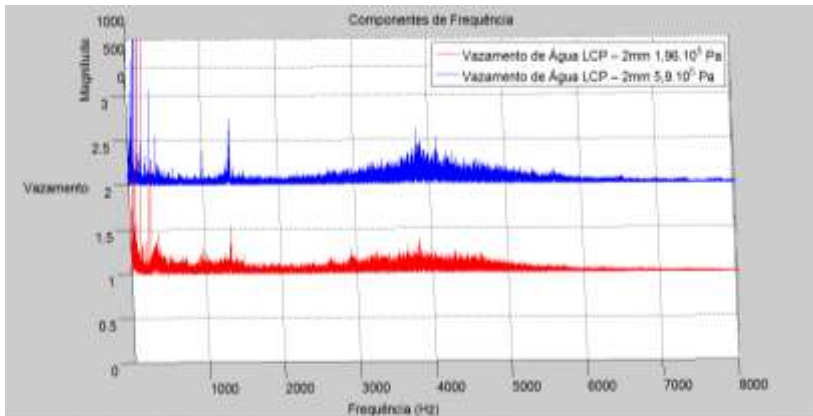


Figura 31 – Influência da pressão para vazamento de água com orifício de vazamento de 3 mm.

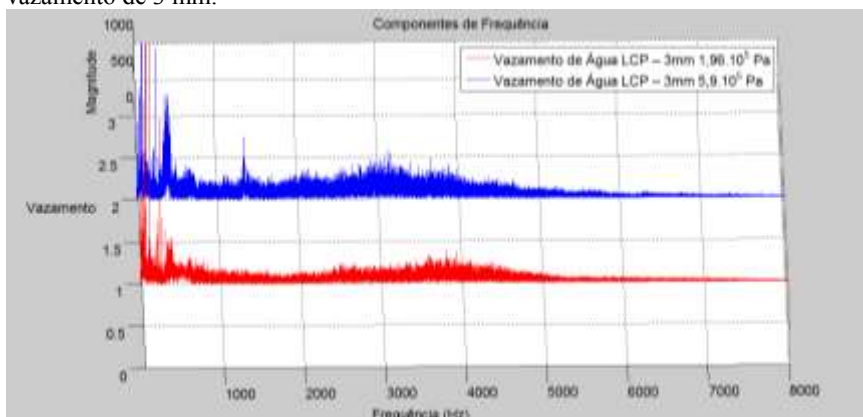


Figura 32 – Influência da pressão para vazamento de água com orifício de vazamento de 4 mm.

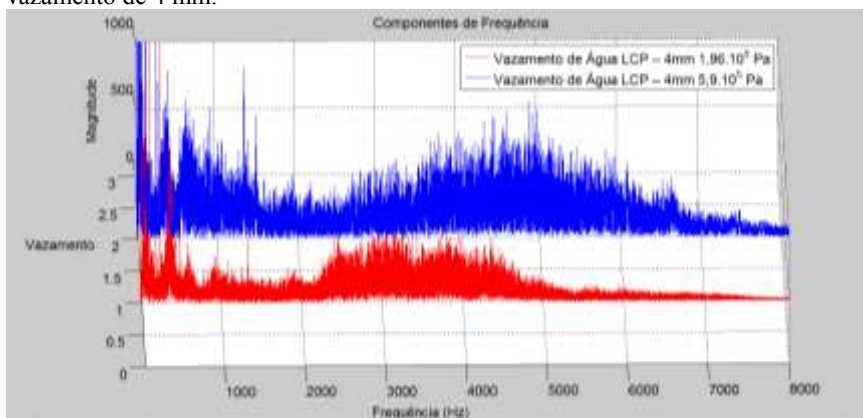
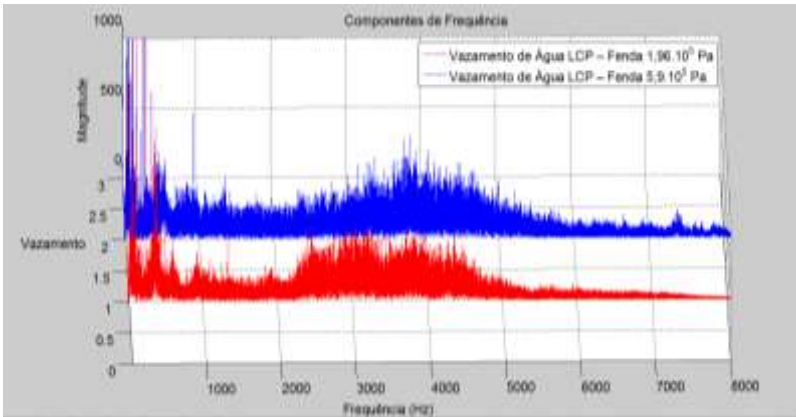


Figura 33 – Influência da pressão para vazamento de água com a fenda como orifício de vazamento.



A Tabela 8 apresenta a influência provocada pelo aumento da pressão interna do duto na frequência média da região de interesse e o desvio padrão para cada um dos orifícios de vazamentos estudados. Houve claramente a tendência de ampliação das frequências médias e a diminuição do desvio padrão com o aumento da pressão.

Tabela 8 - Influência Provocada pelo Aumento de Pressão nos Sinais de Vazamentos Obtidos.

Orifício de Vazamento	Frequência Média da Região de Interesse	Desvio Padrão
1 mm	Aumento de 220 Hz	Diminuiu
2 mm	Aumento de 236 Hz	Diminuiu
3 mm	Diminuição de 212 Hz	Diminuiu
4 mm	Aumento de 559 Hz	Aumentou
Fenda	Aumento de 160 Hz	Aumentou

Assim, analisando-se a tendência dos resultados obtidos para os vazamentos de água no LCP com pressão interna do duto de $1,96 \cdot 10^5$ e $5,9 \cdot 10^5$ Pa é possível afirmar que o aumento do diâmetro do orifício de vazamento deslocava as frequências médias para valores maiores acompanhado do aumento das magnitudes do sinal. Esse mesmo comportamento foi observado quando houve o aumento na pressão interna do duto. Esses comportamentos no espectrograma demonstram que há o estreitamento da base da Gaussiana com a elevação dos picos.

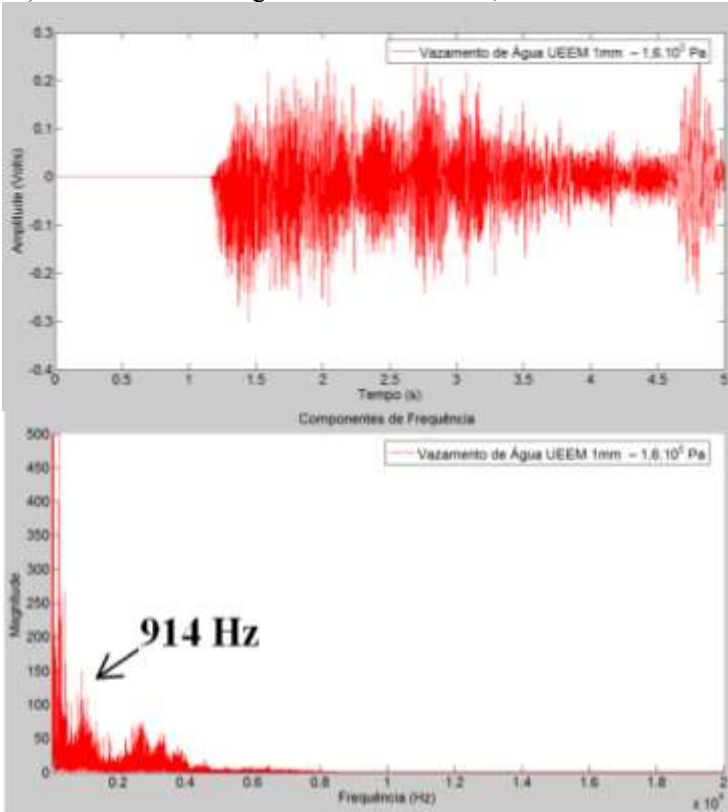
Após a realização dos estudos de vazamento de água no LCP foram realizados testes na UEEM para a verificação da utilização da metodologia em um circuito fechado. Essas experiências puderam enriquecer muito este trabalho uma vez que puderam ser analisados os espectros de frequências de casos de não vazamento como o escoamento de fluido, a abertura e o fechamento de válvulas que são operações recorrentes em redes de dutos.

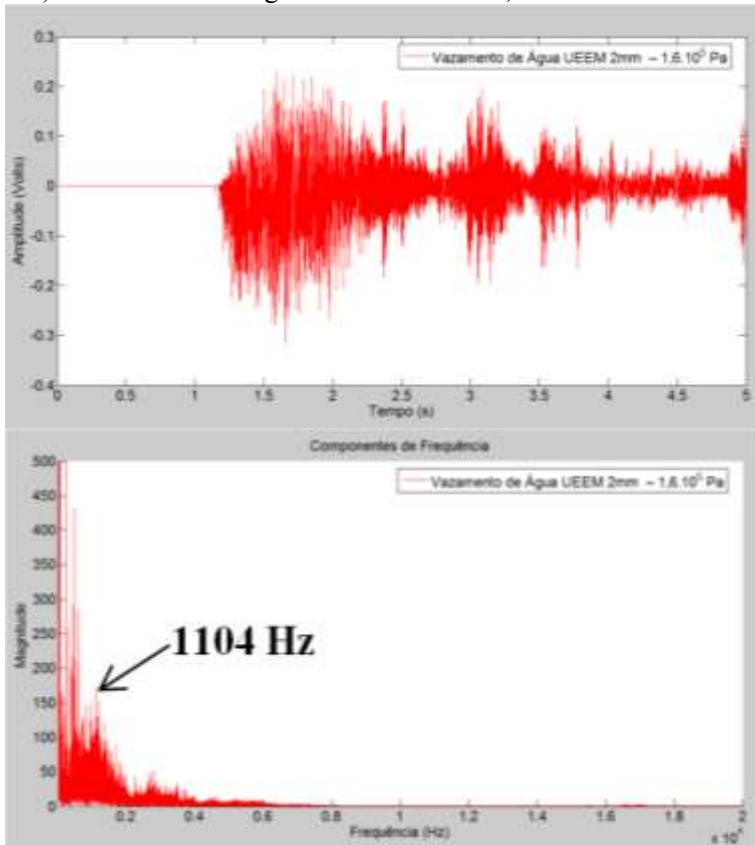
A Figura 34 mostra os sinais em função do tempo com os respectivos espectrogramas de frequências para cada um dos orifícios circulares de vazamentos (1 mm, 2 mm, 3 mm e 4 mm). Não foram apresentados resultados com a fenda uma vez que a fechadura eletromagnética não teve força suficiente para vedar o orifício devido à configuração do sistema com o furo voltado para baixo. Essa medida foi adotada para evitar que o vazamento molhasse os sensores presentes na UEEM.

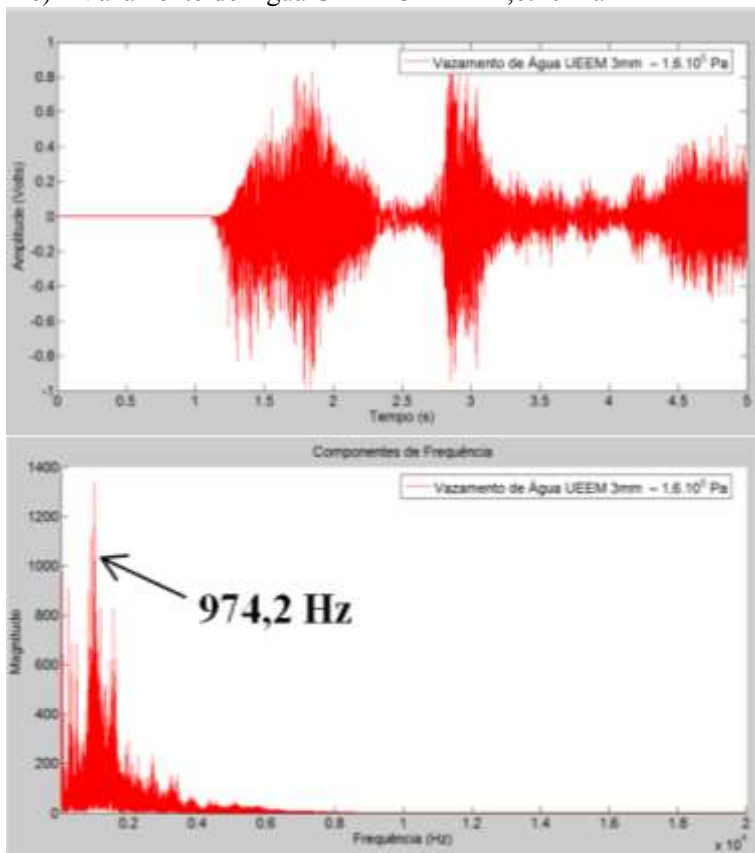
Pela análise dos gráficos dos sinais da Figura 34 novamente nota-se a influência do diâmetro do orifício de vazamento na amplitude. É nítida, por exemplo, a diferença de amplitude ao longo do tempo entre as alcançadas pelo orifício de 4 mm em relação aos de 1 e 2 mm. Para os vazamentos de 1, 2 e 3 mm as frequências máximas são inferiores a 8 kHz. Já no vazamento de 4 mm a partir de 8 até 20 kHz aparece uma região com magnitudes constantes.

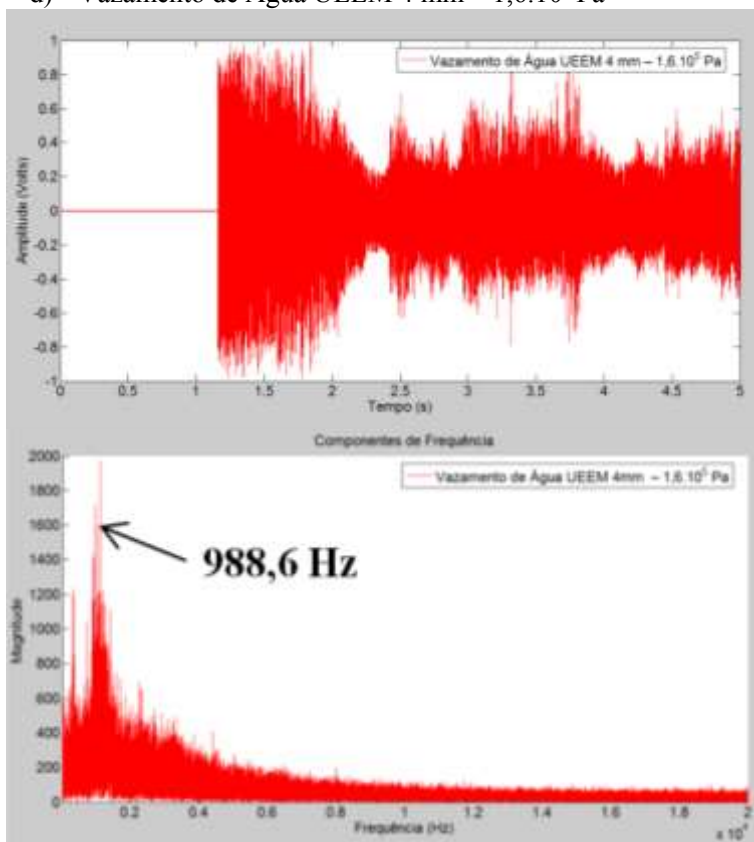
Figura 34 – Vazamentos de Água realizados na UEEM: em a), b), c), d) e e) estão apresentados os sinais dos vazamentos (Amplitude x Tempo) e os respectivos espectros de frequência.

a) Vazamento de Água UEEM 1 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



b) Vazamento de Água UEEM 2 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa

c) Vazamento de Água UEEM 3 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa

d) Vazamento de Água UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa

Na Figura 35 é apresentada a vista superior do espectro tempo-frequência em três dimensões para todos os casos de vazamento de água da UEEM. É possível notar pela análise dessa figura que, diferentemente do que ocorreram com os casos estudados no LCP, não há a presença de uma região de interesse, mas sim de picos de frequência que aparecem em todos os casos.

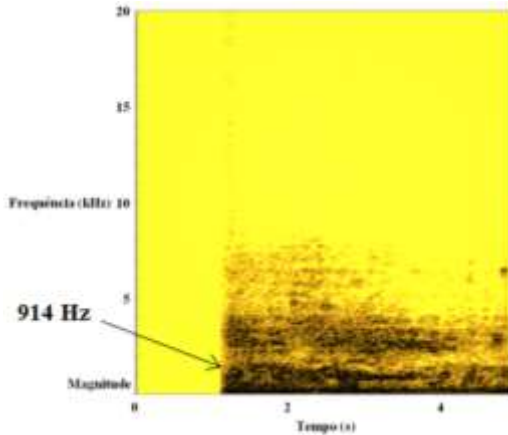
Na Figura 35, foram evidenciados esses picos de 914, 1104, 974,2 e 988,6 Hz os quais correspondem, respectivamente, aos vazamentos de 1, 2, 3 e 4 mm.

Um fato relevante em relação a essas frequências características serem estacionárias durante o vazamento é que elas permitiriam o desenvolvimento de um sistema de detecção de vazamento no qual não

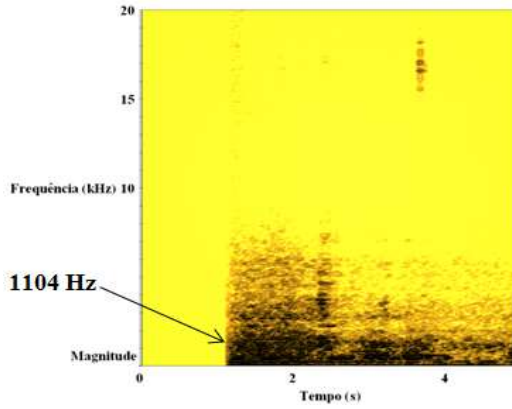
seria necessário monitorar o sistema todo o tempo. Isso porque, ao serem realizadas medições em determinados intervalos de tempo seria possível notar a presença ou não dessas frequências. Caso elas fossem esporádicas o sistema deveria ter monitoramento contínuo o que acarretaria num aumento do custo operacional e computacional para a detecção.

Figura 35 – Diagramas tempo-frequência dos Vazamentos de Água da UEEM de 1, 2, 3 e 4 mm com pressão interna de $1,6 \cdot 10^5$ Pa.

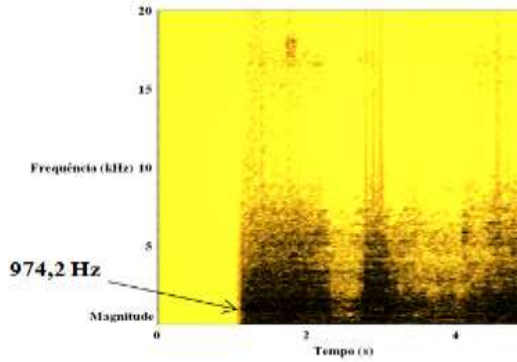
- a) Diagrama tempo-frequência do Vazamento de água UEEM – 1 mm $1,6 \cdot 10^5$ Pa



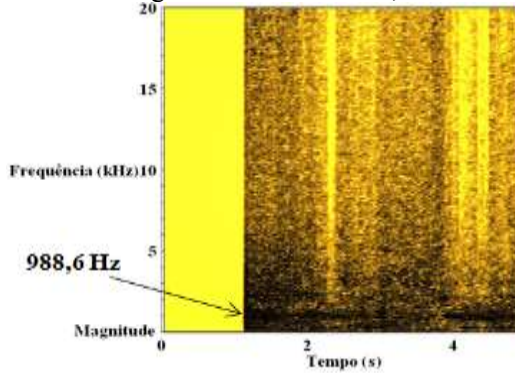
b) Vazamento de água UEEM – 2 mm $1,6 \cdot 10^5$ Pa



c) Vazamento de água UEEM – 3 mm $1,6 \cdot 10^5$ Pa



d) Vazamento de água UEEM – 4 mm $1,6 \cdot 10^5$ Pa



As diferenças encontradas em relação às características dos sinais de vazamentos no LCP e na UEEM não implicam que o método utilizado neste trabalho não seja robusto ao ponto de não poder ser utilizado em outros sistemas. Ocorre que a maioria dos sistemas de detecção já disponível no mercado precisa passar por calibração no momento de sua instalação. Para realizar essa calibração é necessário simular as operações rotineiras do duto, como abertura e fechamento de válvulas e também a simulação de um vazamento através de um orifício na parede do mesmo. Com base nessas simulações, será possível caracterizar o comportamento do sistema nos casos de vazamento e também nos de não vazamento.

Em relação aos parâmetros estudados foi possível notar que o aumento do diâmetro do orifício de vazamento de 1 para o de 2 mm a frequência média ou a característica aumentava. Porém do orifício de 2 para o de 3 mm essas frequências diminuíram em todos os casos. Já de 3 para 4 mm elas sempre aumentavam. Em relação à utilização da fenda como orifício de vazamento, com a pressão de $1,96 \cdot 10^5$ Pa o valor de frequência média aproximou-se ao do orifício de 4 mm e com a pressão de $5,9 \cdot 10^5$ Pa ao de 1 mm. Em relação ao aumento de pressão em todos os casos houve um deslocamento da frequência média para valores maiores, exceto para o orifício de 3 mm. Esse aumento de pressão ainda provocou em todos os casos o aumento da magnitude do sinal, ou seja, quanto maior a variação de pressão maior será a vibração causada no duto.

4.2 Vazamentos de Ar

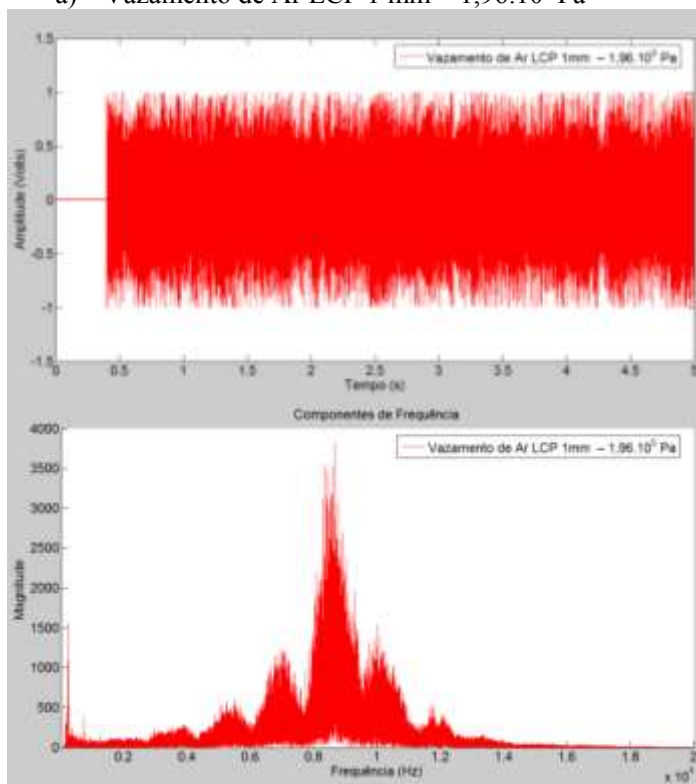
Para simular situações de vazamentos de gás natural, utilizaram-se a bancada experimental do LCP e a UEEM para realizar experimentos com ar comprimido como fluido. Esses experimentos tinham por objetivo estudar o efeito do tipo de fluido (gás ou líquido) no espectro de frequências dos vazamentos.

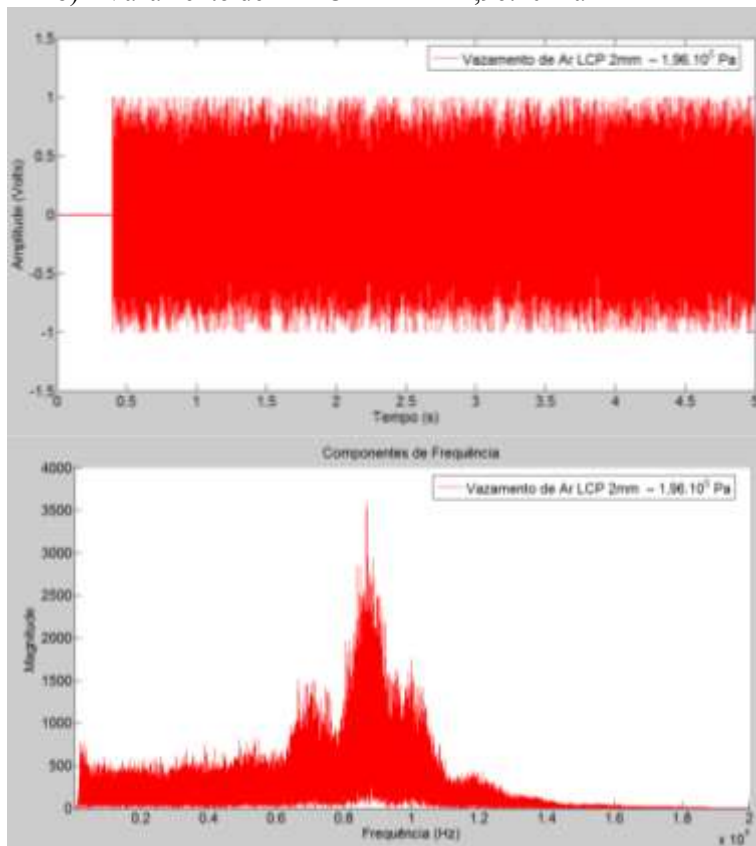
Na Figura 36 são apresentados os resultados obtidos para os vazamentos de ar no LCP para cada orifício disponível (1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm e a fenda) com pressão interna do duto de $1,96 \cdot 10^5$ Pa. Foram tratados os sinais dos vazamentos (amplitude em função do tempo) e calculados os respectivos espectros de frequência, utilizando-se a Transformada Rápida de Fourier. Concomitantemente à abertura da fechadura eletromagnética iniciava-se a captação do sinal gerado pelo

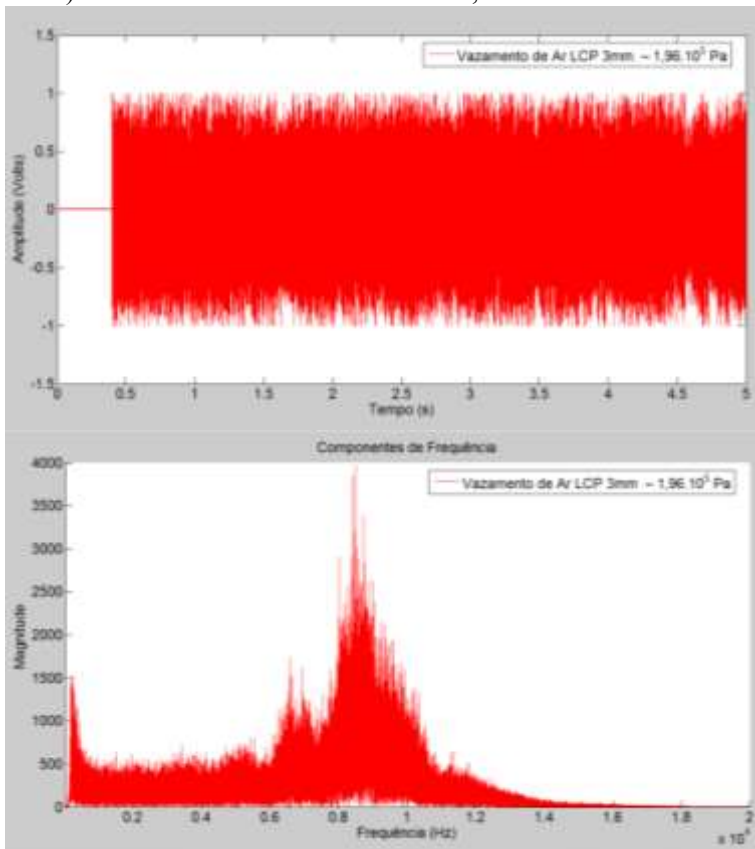
vazamento. Em todos os casos o início do vazamento ocorreu por volta dos 0,4 s quando ocorre o primeiro pico de tensão. Pela análise do gráfico do sinal é possível notar um grande pico na amplitude quando o vazamento é iniciado. Em todos os casos fica nítida a semelhança entre os sinais obtidos, independentemente do tamanho do orifício de vazamento, incluindo a fenda. Em relação ao espectro de frequência é notável que, apesar de o sistema conseguir medir até 20 kHz, foram captadas frequências com amplitudes significativas apenas até 14 kHz.

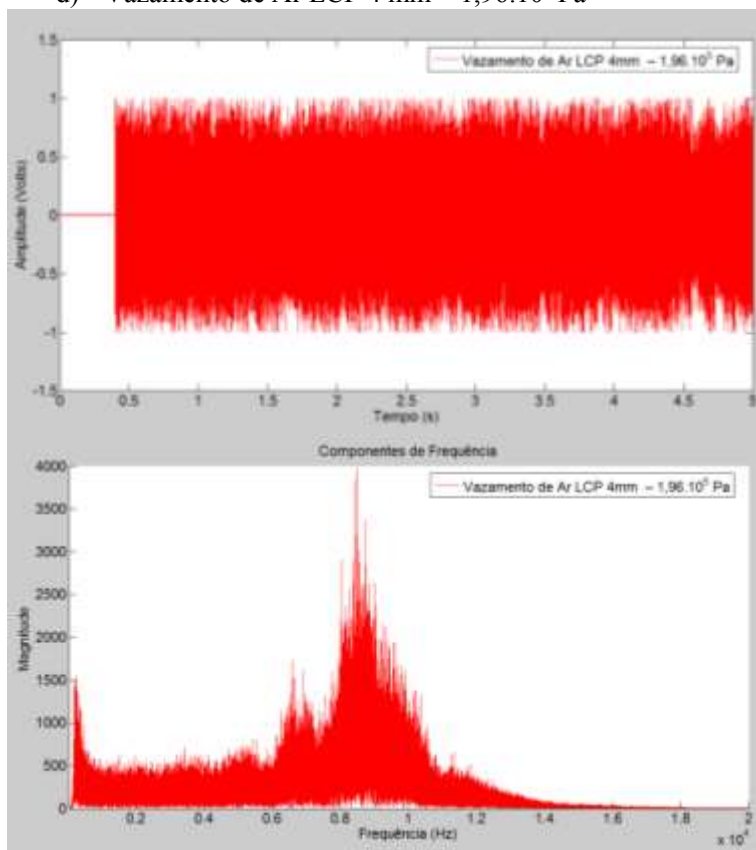
Figura 36 – Vazamentos de Ar realizados no LCP: em a), b), c), d) e e) estão apresentados os sinais dos vazamentos (Amplitude x Tempo) e os respectivos espectros de frequência.

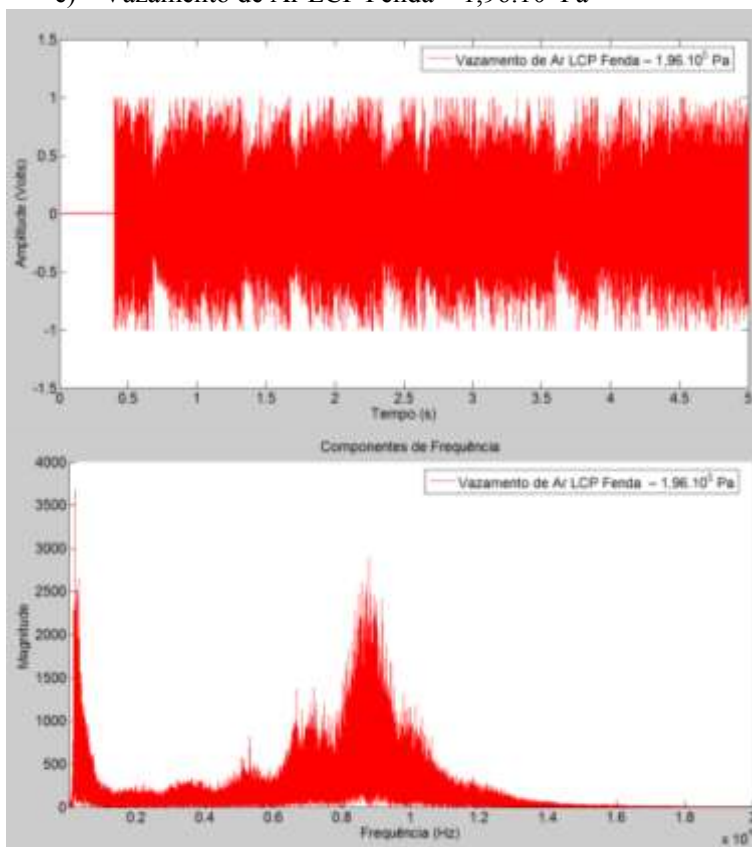
a) Vazamento de Ar LCP 1 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa



b) Vazamento de Ar LCP 2 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa

c) Vazamento de Ar LCP 3 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa

d) Vazamento de Ar LCP 4 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa

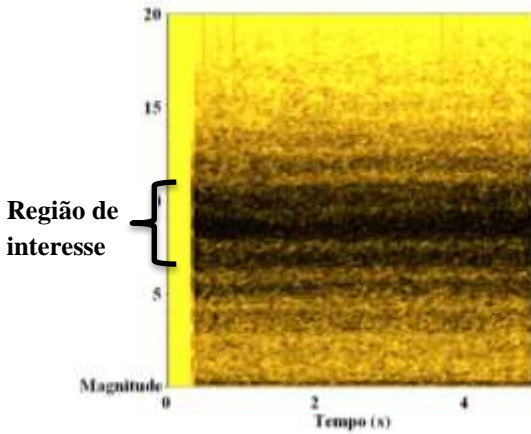
e) Vazamento de Ar LCP Fenda – $1,96 \cdot 10^5$ Pa

A Figura 37 apresenta os espectros tempo-frequência dos vazamentos de ar com orifício de vazamento de 1 mm e da fenda com pressão interna do duto ajustada em $1,96 \cdot 10^5$ Pa. Mais uma vez, é possível notar na vista superior a presença de uma região mais escura no gráfico entre 6 e 11 kHz. Essa região seria o foco deste estudo.

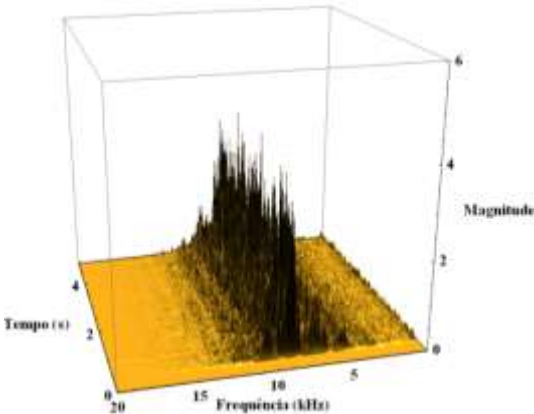
Igualmente, ao ser observada a vista lateral do espectro em três dimensões fica evidente a natureza estacionária do sinal, já que não há variações sensíveis nele ao longo do tempo. Fica nítida também a pouca influência da geometria do orifício de vazamento nos espectros, uma vez que, como pode ser observado, eles são bastante semelhantes.

Figura 37 – Diagramas tempo-frequência do Vazamento de Ar LCP – 1 mm $1,96 \cdot 10^5$ Pa e do Vazamento de Ar LCP - Fenda $1,96 \cdot 10^5$ Pa.

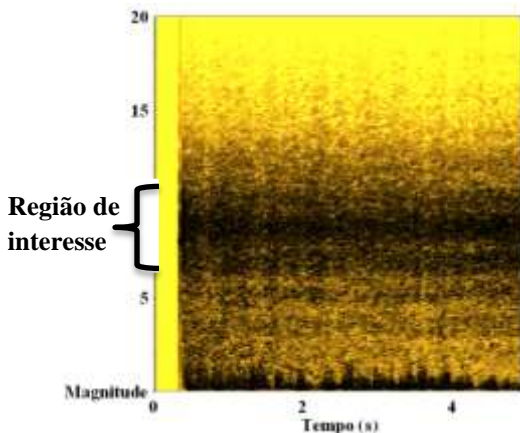
- a) Diagrama tempo-frequência do Vazamento de Ar LCP 1 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa



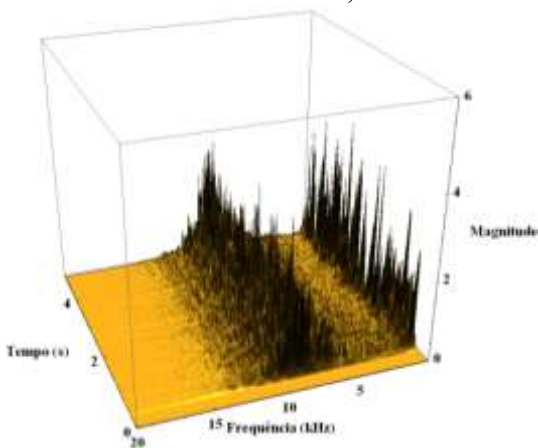
- b) Diagrama tempo-frequência em 3D do Vazamento de Ar LCP 1 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa



- c) Diagrama tempo-frequência do Vazamento de Ar LCP Fenda – $1,96 \cdot 10^5$ Pa



- d) Diagrama tempo-frequência em 3D do espectro do Vazamento de Ar LCP Fenda – $1,96 \cdot 10^5$ Pa



Devido ao fato de novamente ter-se obtido uma região de interesse foram ajustadas Gaussianas para esses vazamentos. Diferentemente do que foi feito para os vazamentos de água, nos quais foram ajustadas Gaussianas de primeira ordem, para os de ar foram feitas de primeira e terceira ordens. Isso porque, na maior parte dos casos, não aparece apenas uma elevação, mas três. Na equação 17 a fórmula da Gaussiana de terceira ordem é apresentada.

$$f(x) = a_1 * \exp\left(-\left(\frac{x - b_1}{c_1}\right)^2\right) + a_2 * \exp\left(-\left(\frac{x - b_2}{c_2}\right)^2\right) + a_3 * \exp\left(-\left(\frac{x - b_3}{c_3}\right)^2\right) \quad (17)$$

Na Tabela 9, são apresentados os valores obtidos para as constantes das Gaussianas de terceira ordem obtidos através da *Toolbox Curve Fitting*.

Tabela 9 - Valores das constantes das Gaussianas de terceira ordem ajustadas para o Vazamento de Ar com $1,96.10^5$ Pa.

	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	a_3	b_3	c_3	R^2
1 mm	505,8	7029	702,1	1776	8676	584,6	637	10210	661,1	0,9031
2 mm	1140	7023	581,6	2091	8679	516,3	1176	10040	494,7	0,9048
3 mm	1064	6755	517	1812	8704	854,4	863	10270	358,2	0,8924
4 mm	1001	6934	615,5	1841	8806	736,5	837,2	10310	472,3	0,8472
Fenda	795,4	7078	717,2	1976	8808	546,8	715,3	10300	528,3	0,8833

Avaliando-se os valores encontrados para a_1 , nota-se que:

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um incremento de 125% no valor em relação ao de 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve uma diminuição de 7% no valor em relação ao de 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve novamente uma queda de 6% no valor em relação ao de 3 mm;
- o valor obtido para o vazamento com a fenda aumenta 57% em relação ao de 1 mm;
- o vazamento com orifício de 2 mm foi o que obteve o maior valor para magnitude.

Em relação a a_2 :

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um incremento de 118% no valor em relação ao de 1 mm;

- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve uma diminuição de 13% no valor em relação ao de 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um incremento de 102% no valor em relação ao de 3 mm;
- o valor obtido para o vazamento com a fenda 5% menor que o de 2 mm;

Em relação a a_3 , nota-se que:

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um incremento de 185% no valor em relação ao de 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve uma diminuição de 27% no valor de 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve novamente uma queda de 3% no valor de 3 mm;
- o valor obtido para o vazamento com a fenda equivale a 113% no valor em relação ao de 1 mm;
- o vazamento com orifício de 2 mm foi o que obteve o maior valor para magnitude.

Os valores obtidos para a_1 , a_2 e a_3 demonstram que o aumento do orifício de 1 para 2 mm acarreta no aumento dos valores de magnitude alcançados. Já em comparação com o aumento de 2 para 3 mm e de 3 para 4 mm ocorre uma diminuição da magnitude. Isso provavelmente ocorre porque acima de 2 mm a interação ar e a borda do orifício diminui tornando o sinal menos intenso.

Em relação à b_1 :

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm os valores obtidos diminuíram em 6 Hz;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve uma diminuição considerável de 268 Hz;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um incremento considerável de 179 Hz;
- o vazamento com a fenda obteve o maior valor (7078 Hz);

Em relação a b_2 :

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm os valores obtidos foram os mesmos;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve um aumento de 25 Hz;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um incremento de 102 Hz;
- o valor obtido para o vazamento com a fenda foi o que obteve o maior valor para magnitude com diferença de apenas 2 Hz a mais em relação ao de 4 mm;

Em relação a b_3 :

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm os valores obtidos diminuíram em 170 Hz;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve um aumento de 230 Hz;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um incremento de 40 Hz;
- o vazamento com a fenda possui 10 Hz a menos em relação ao de 4 mm o qual foi o maior valor alcançado;

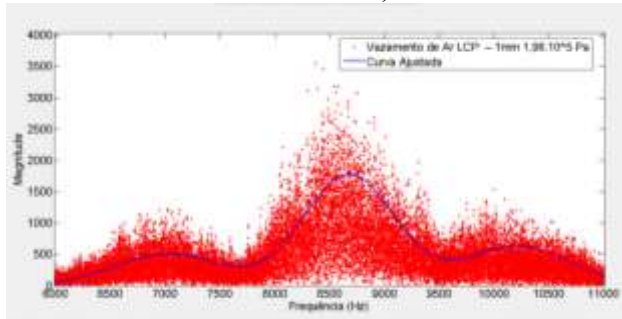
Os valores obtidos para b_1 , b_2 e b_3 evidenciam que o aumento do orifício de 1 para 2 mm acarreta na diminuição dos valores das frequências médias. Já em comparação com o aumento de 2 para 3 mm e de 3 para 4 mm ocorre um aumento desses valores. Comparando-se com os valores de magnitude anteriormente relatados tem-se que o sinal de 1 para 2 mm ficou mais intenso, porém, com frequências médias menores. Já para os demais casos, os sinais ficaram menos intensos com frequências médias maiores.

Já em relação a constante c_1 os valores em ordem crescente são: 3 mm, 2 mm, 4 mm, 1 mm e a fenda. Para c_2 , 2 mm, fenda, 1 mm, 4 mm e 3 mm e para c_3 , 3 mm, 4 mm, 2 mm, fenda e 1 mm.

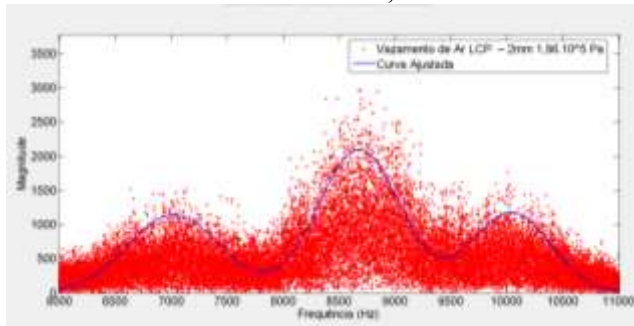
A Figura 38 apresenta as Gaussianas de terceira ordem ajustadas para os respectivos dados experimentais dos casos de vazamentos.

Figura 38 – Gaussianas de terceira ordem ajustadas para os vazamentos de ar com pressão de $1,96.10^5$ Pa.

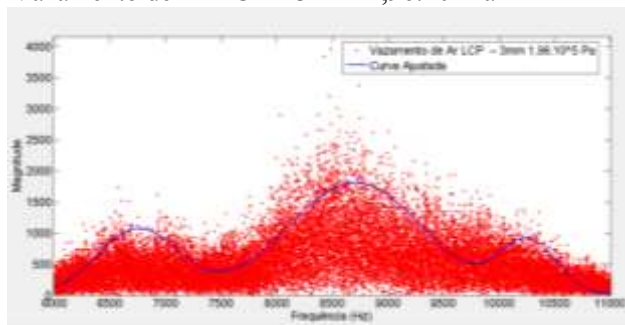
a) Vazamento de Ar LCP – 1 mm $1,96.10^5$ Pa

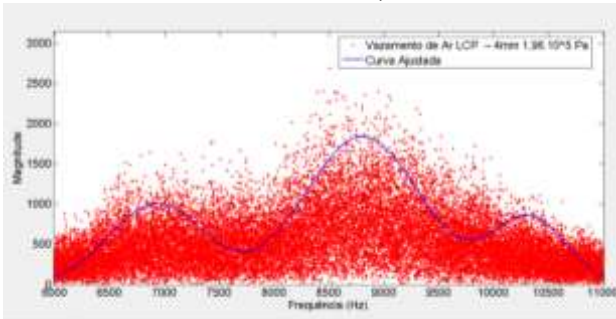
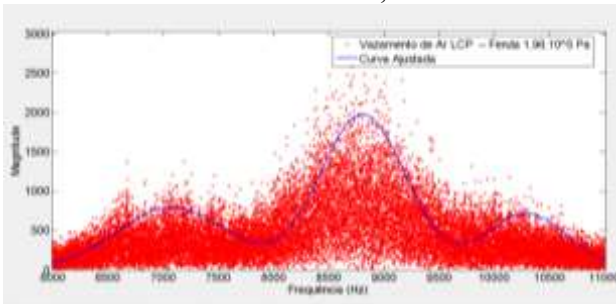


b) Vazamento de Ar LCP – 2 mm $1,96.10^5$ Pa



c) Vazamento de Ar LCP – 3 mm $1,96.10^5$ Pa



d) Vazamento de Ar LCP – 4 mm $1,96.10^5$ Pae) Vazamento de Ar LCP – Fenda $1,96.10^5$ Pa

Foram ajustadas para esses mesmos casos de vazamentos, Gaussianas de primeira ordem para analisar qual dos dois tipos teria um melhor coeficiente de ajuste. Na Tabela 10 são apresentados os valores encontrados para as Gaussianas de primeira ordem.

Tabela 10 - Valores das constantes das Gaussianas de primeira ordem ajustadas para Vazamento de Ar com $1,96.10^5$ Pa.

	a_1	b_1	c_1	R^2
1 mm	1397	8580	1721	0,8513
2 mm	1129	8539	1836	0,8593
3 mm	1453	8472	1718	0,8517
4 mm	1642	8498	1720	0,9101
Fenda	1404	8588	1613	0,8537

Avaliando-se os valores encontrados para a_1 , nota-se que:

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um decréscimo de 19% em relação ao valor de 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve um aumento de 29% vezes do valor de 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um incremento 13% vezes do valor de 3 mm;
- o vazamento com a fenda possui valor 0,5% superior ao de 1 mm;
- o vazamento com orifício de 4 mm foi o que obteve o maior valor de magnitude.

Esses valores demonstram que o aumento do orifício tende a aumentar os valores das magnitudes do sinal.

Em relação a b_1 :

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm os valores decresceram em 41 Hz;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm os valores decresceram em 67 Hz;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um aumento de 26 Hz;
- o vazamento com a fenda foi o que obteve o maior valor de frequência média superando em 8 Hz o valor de 1 mm;

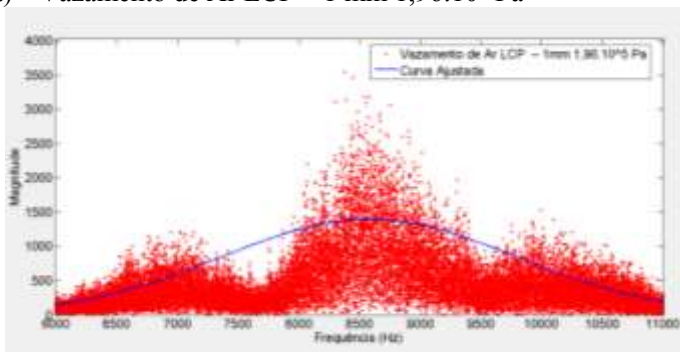
A tendência foi que o aumento do diâmetro causou o deslocamento da frequência média para regiões menores valores (1 mm para 2 mm e de 2 para 3 mm). Porém, a partir do vazamento de 3 mm, o aumento do orifício aumentou as frequências médias obtidas.

Já em relação a constante c_1 os valores obtidos para 1, 3 e 4 mm foram bastante semelhantes. A fenda foi a que obteve menor desvio padrão e o vazamento com orifício de 2 mm foi a que obteve o maior valor.

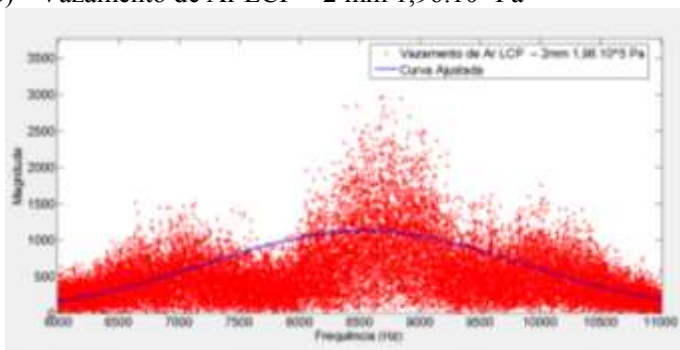
Na Figura 39 são apresentadas as Gaussianas de primeira ordem obtidas com a utilização das constantes da Tabela 9. De um modo geral, esse tipo de Gaussiana não se mostrou suficientemente adequado para a representação dos dados experimentais obtidos.

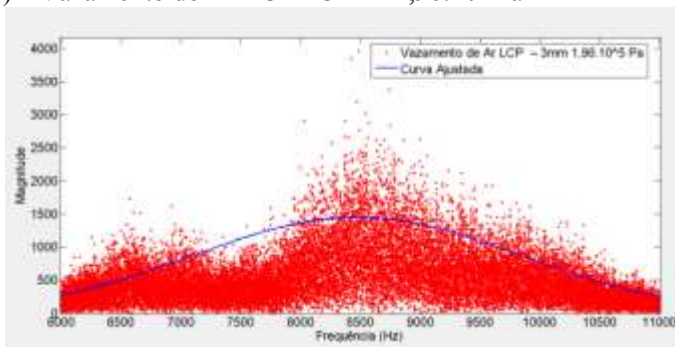
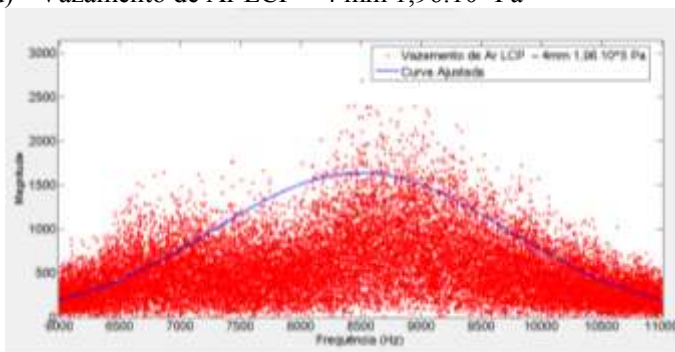
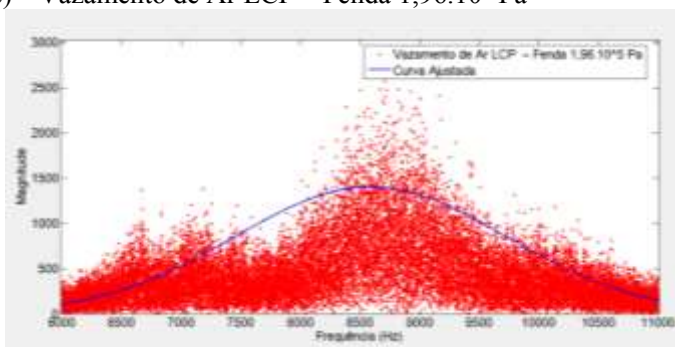
Figura 39 – Gaussianas de primeira ordem ajustadas para os vazamentos de ar com pressão de $1,96 \cdot 10^5$ Pa.

a) Vazamento de Ar LCP – 1 mm $1,96 \cdot 10^5$ Pa



b) Vazamento de Ar LCP – 2 mm $1,96 \cdot 10^5$ Pa



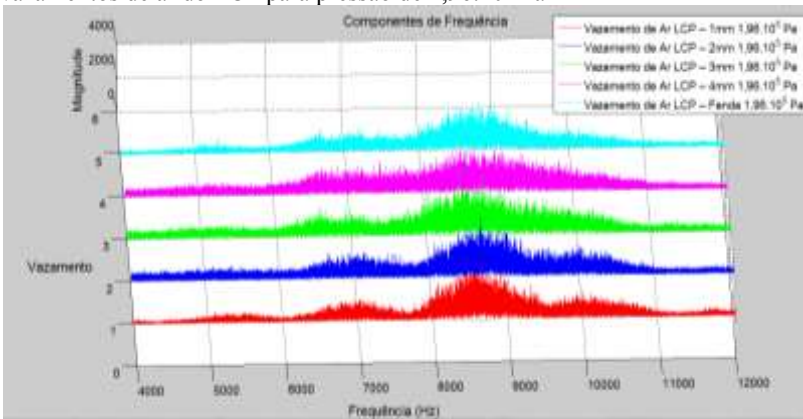
c) Vazamento de Ar LCP – 3 mm $1,96.10^5$ Pad) Vazamento de Ar LCP – 4 mm $1,96.10^5$ Pae) Vazamento de Ar LCP – Fenda $1,96.10^5$ Pa

Excetuando-se o caso do vazamento de 4 mm, todos os demais tiveram o coeficiente de ajuste superior com as Gaussianas de terceira

ordem. Porém, vale ressaltar que para ajustar essas curvas o custo computacional, devido a sua complexidade, é muito superior em relação às de primeira ordem.

Na Figura 40 são apresentados concomitantemente os casos de vazamento de ar nos quais foi utilizada a pressão interna do duto de $1,96 \cdot 10^5$ Pa. Através dela é possível observar as influências causadas pelo aumento no diâmetro do orifício de vazamento e na utilização da fenda. Essas influências foram detalhadas através das constantes a_1 , b_1 e c_1 e apresentadas anteriormente.

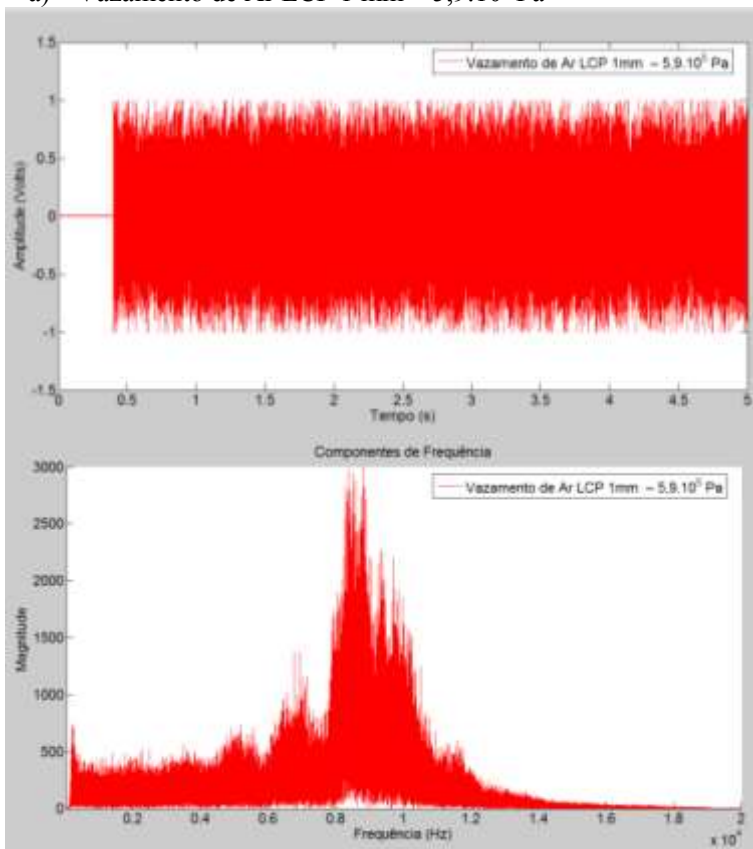
Figura 40 – Influência do diâmetro do orifício de vazamento nos espectros de vazamentos de ar do LCP para pressão de $1,96 \cdot 10^5$ Pa

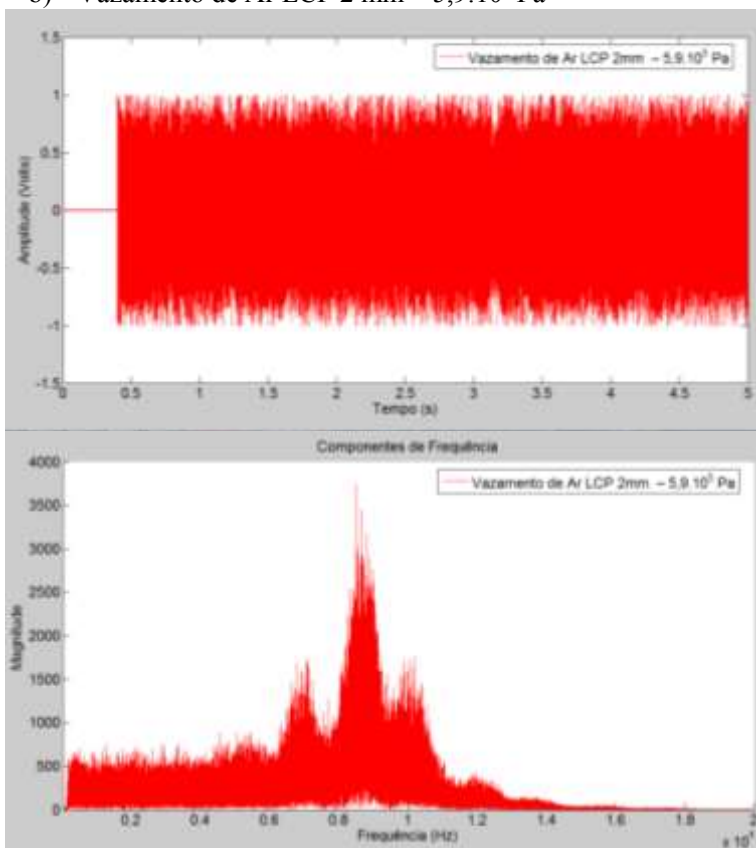


Para avaliar a influência da variação da pressão no espectro de frequências dos vazamentos foram feitos testes com a pressão de $5,9 \cdot 10^5$ Pa. A Figura 41 apresenta os resultados obtidos para os vazamentos de ar no LCP para cada orifício disponível (1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm e a fenda). O início do vazamento é marcado pela abertura da fechadura eletromagnética. Esse fenômeno fica evidente nos gráficos dos sinais na Figura 41. Antes dele o microfone não capta nenhum sinal e quando ele se inicia há um pico nos valores de tensão. Há pouca variação na amplitude do sinal nos 5 segundos analisados o que indica que a pressão interna do duto diminui lentamente. Em relação ao espectro de frequência é notável que, apesar de o sistema conseguir medir até 20 kHz, foram captadas frequências com amplitudes significativas apenas até 14 kHz.

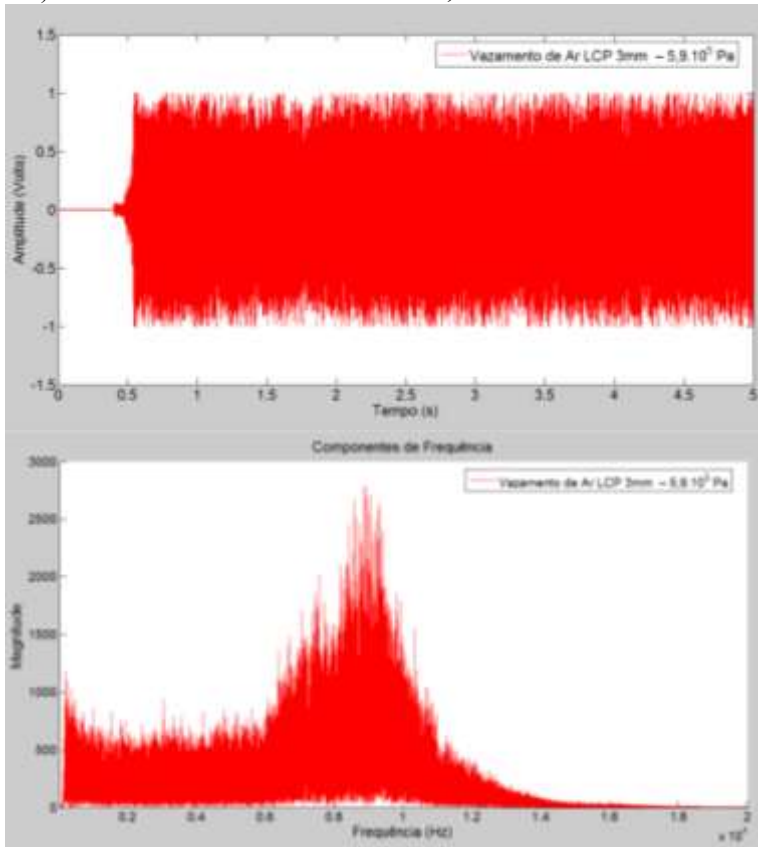
Figura 41 – Vazamentos de Ar realizados no LCP: em a), b), c), d) e e) estão apresentados os sinais dos vazamentos (Amplitude x Tempo) e os respectivos espectros de frequência.

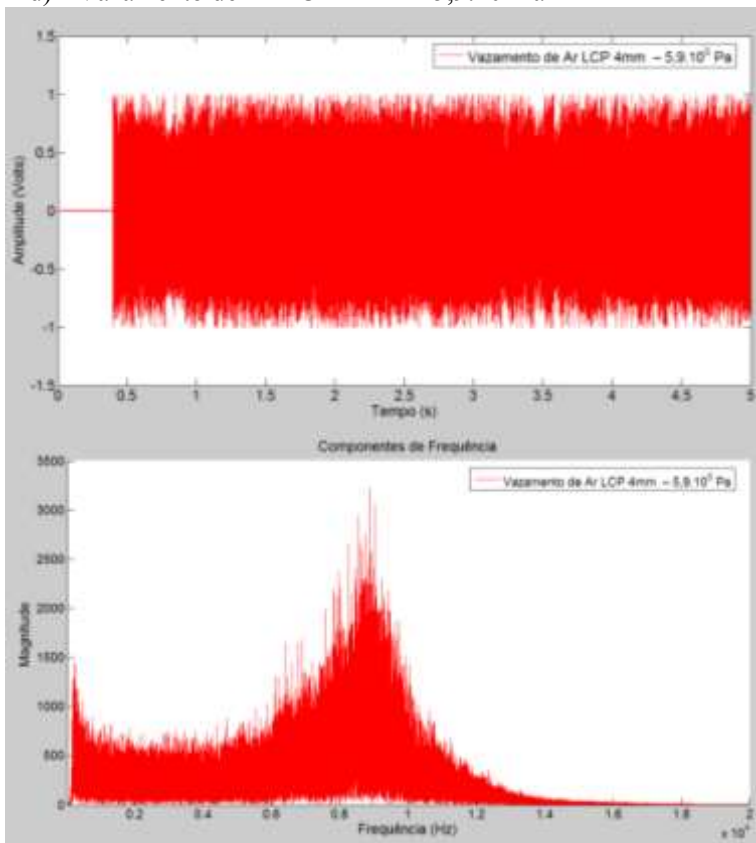
a) Vazamento de Ar LCP 1 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa

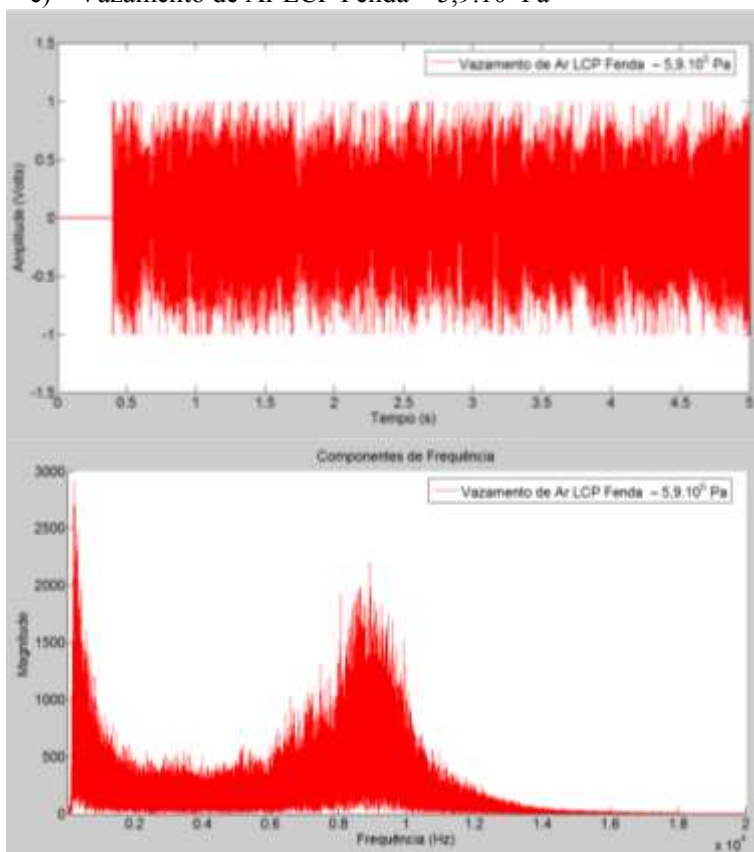


b) Vazamento de Ar LCP 2 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa

c) Vazamento de Ar LCP 3 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa



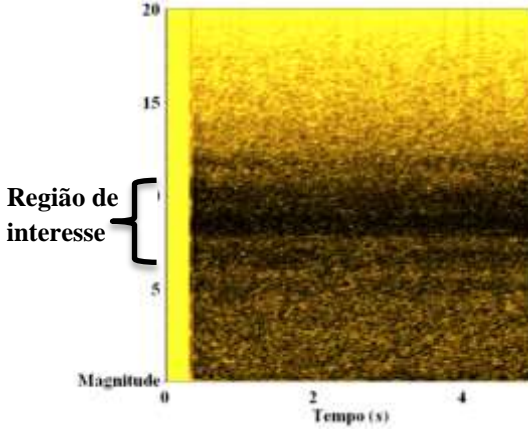
d) Vazamento de Ar LCP 4 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa

e) Vazamento de Ar LCP Fenda – $5,9 \cdot 10^5$ Pa

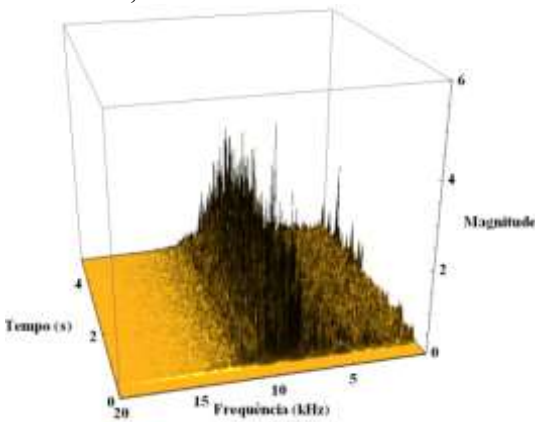
A Figura 42 mostra os espectros tempo-frequência dos vazamentos de ar com orifício de vazamento de 2 mm e da fenda com pressão interna do duto ajustada em $5,9 \cdot 10^5$ Pa. Em ambos os casos na vista superior há a presença de uma região de interesse no gráfico entre 6 e 11 kHz. Mais uma vez o sinal obtido foi estacionário.

Figura 42 – Diagramas tempo-frequência em 3D do Vazamento de Ar LCP – 1 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa e do Vazamento de Ar LCP - Fenda $5,9 \cdot 10^5$ Pa. Em a) e c) têm-se as vistas superiores e em b) e d) as vistas laterais dos respectivos vazamentos.

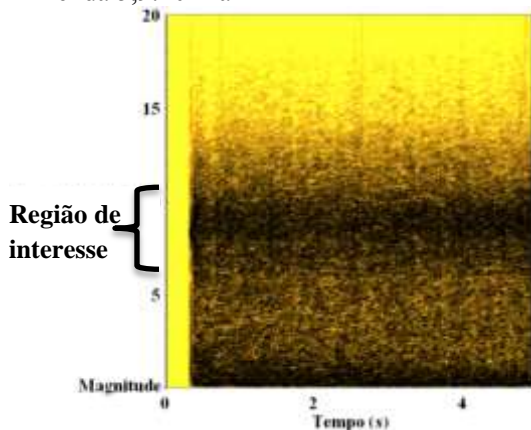
- a) Diagrama tempo-frequência do Vazamento de Ar LCP – 1 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa



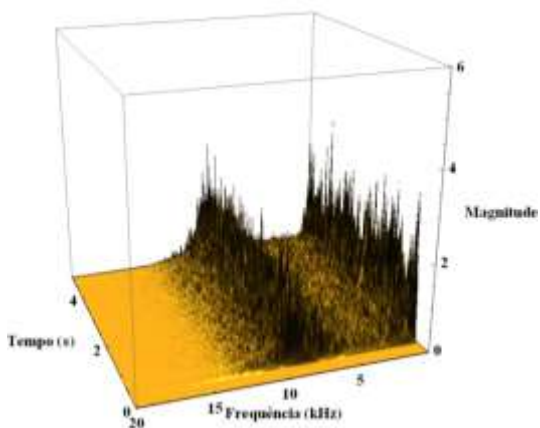
- b) Diagrama tempo-frequência do espectro do Vazamento de Ar LCP – 1 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa



- c) Diagrama tempo-frequência do espectro do Vazamento de Ar LCP - Fenda $5,9 \cdot 10^5$ Pa



- d) Diagrama tempo-frequência do espectro do Vazamento de Ar LCP - Fenda $5,9 \cdot 10^5$ Pa



Semelhantermente ao que ocorreu com os vazamentos de ar anteriores não foram obtidos picos característicos de vazamentos e sim regiões. Essas regiões novamente serão avaliadas com a utilização de Gaussianas de primeira e terceira ordens. Na Tabela 11 são apresentados os valores utilizados no modelo da Gaussiana de terceira ordem.

Tabela 11 - Valores das constantes das Gaussianas de terceira ordem ajustadas para Vazamento de Ar com $5,9 \cdot 10^{-2}$ Pa.

	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	a_3	b_3	c_3	R^2
1 mm	727,6	6759	594,6	1899	8556	581,5	841,3	10070	697,9	0,8556
2 mm	1134	6903	596,7	2229	8646	526,4	1230	10170	530,1	0,8588
3 mm	1055	7054	768,9	1681	8795	612,8	786,8	10240	629	0,8403
4 mm	923,1	6742	682,2	1990	8770	916,9	704,6	10470	360,6	0,8249
Fenda	588,3	6720	634,8	1429	8815	869,3	410,6	10540	438	0,8226

Avaliando-se os valores encontrados para a_1 , nota-se que:

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um incremento de 56% no valor em relação ao de 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve uma diminuição de 7% no valor em relação ao de 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve novamente uma queda de 12% no valor em relação ao de 3 mm;
- o valor obtido para o vazamento com a fenda é 19,2% menor que o de 1 mm;
- o vazamento com orifício de 2 mm foi o que obteve o maior valor para magnitude.

Para os valores encontrados para a_2 , nota-se que:

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um incremento de 17% no valor em relação ao de 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve uma diminuição de 25% no valor em relação ao de 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um incremento de 18% no valor em relação ao de 3 mm;
- o valor obtido para o vazamento com a fenda 15% menor que o de 3 mm;

Para os valores de a_3 , nota-se que:

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um incremento de 46% no valor em relação ao de 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve uma diminuição de 36% no valor de 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve novamente uma queda de 10% no valor de 3 mm;
- o valor obtido para o vazamento com a fenda equivale é 51% menor que o de 1 mm;
- o vazamento com orifício de 2 mm foi o que obteve o maior valor para magnitude.

Nesse caso, o comportamento obtido para a_1 , a_2 e a_3 foi idêntico ao do vazamento de ar com pressão de $1,96 \cdot 10^5$ Pa.

Em relação a b_1 :

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm os valores obtidos aumentaram em 144 Hz;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve um aumento de 151 Hz;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um decréscimo de 310 Hz;
- o vazamento com a fenda é 22 Hz menor que o de 4 mm;

Em relação a b_2 :

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um incremento de 90 Hz em relação ao valor de 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve um aumento de 149 Hz;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve uma diminuição de 25 Hz;
- o valor obtido para o vazamento com a fenda foi o que obteve o maior valor para magnitude com diferença de 20 Hz a mais em relação ao de 3 mm;

Em relação a b_3 :

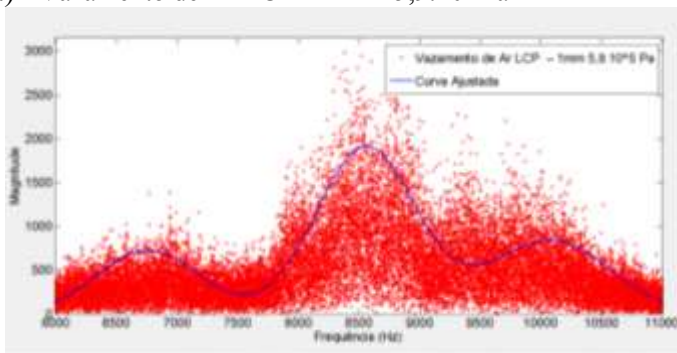
- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm os valores obtidos aumentaram em 100 Hz;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve um aumento de 70 Hz;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um incremento de 230 Hz;
- o vazamento com a fenda obteve o maior valor;

Os valores obtidos para b_1 , b_2 e b_3 evidenciam que o aumento do orifício de 1 para 2 mm e de 2 para 3 mm acarretam no aumento dos valores das frequências médias. Já em comparação com o aumento de 3 para 4 mm ocorre uma diminuição desse valor. Comparando-se com os valores de magnitude anteriormente relatados tem-se que o sinal de 1 para 2 mm ficou mais intenso e com frequências médias maiores. No caso de 2 para 3 mm o sinal ficou menos intenso com frequência média maior. Já de 3 para 4 mm o sinal também ficou menos intenso, porém com frequência média menor.

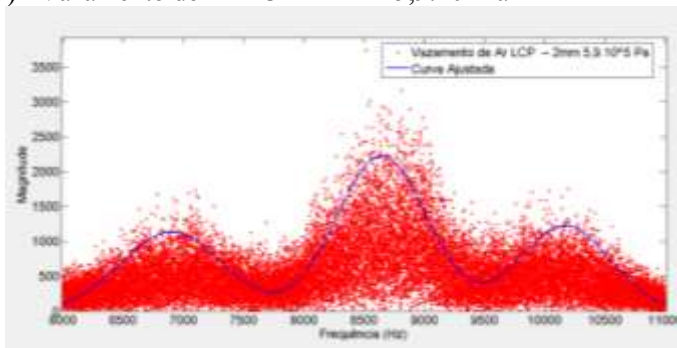
Já em relação a constante c_1 os valores em ordem crescente são: 1 mm, 2 mm, fenda, 4 mm e 3 mm. Para c_2 , 2 mm, 1 mm, 3 mm, fenda e 4 mm e c_3 4 mm, fenda, 2 mm, 3 mm e 1 mm. A Figura 43 apresenta as Gaussianas de terceira ordem ajustadas para os respectivos casos de vazamentos.

Figura 43 – Gaussianas de terceira ordem ajustadas para os vazamentos de ar com pressão de $5,9 \cdot 10^5$ Pa.

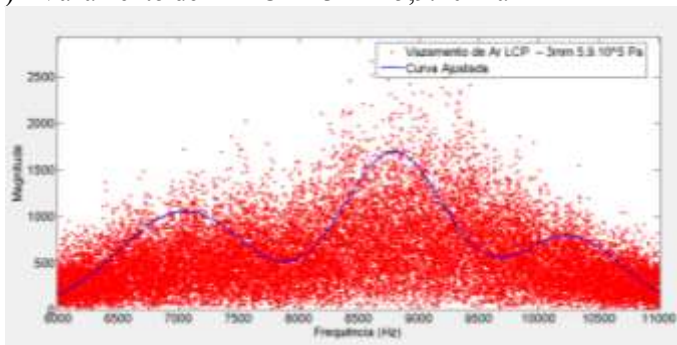
a) Vazamento de Ar LCP – 1 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa



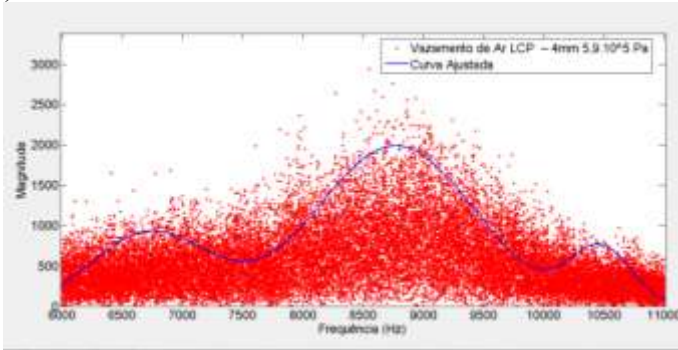
b) Vazamento de Ar LCP – 2 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa



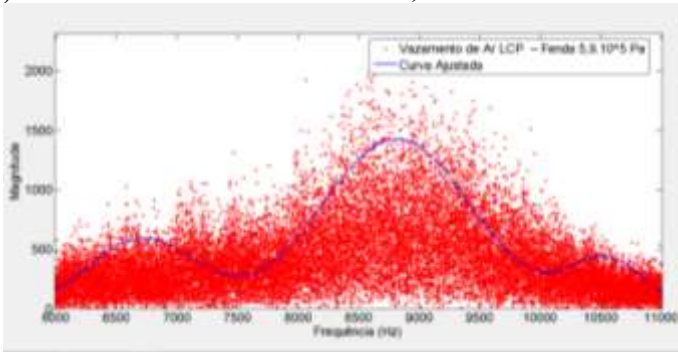
c) Vazamento de Ar LCP – 3 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa



d) Vazamento de Ar LCP – 4 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa



e) Vazamento de Ar LCP – Fenda $5,9 \cdot 10^5$ Pa



Foram ajustadas para esses mesmos casos de vazamentos Gaussianas de primeira ordem para analisar qual dos dois tipos teria um melhor coeficiente de ajuste. Na Tabela 12 são apresentados os valores encontrados para as Gaussianas de primeira ordem.

Tabela 12 - Valores das constantes das Gaussianas de primeira ordem ajustadas para Vazamento de Ar com $5,9 \cdot 10^5$ Pa.

	a_1	b_1	c_1	R^2
1 mm	1798	8582	1635	0,8152
2 mm	1758	8565	1553	0,8345
3 mm	1621	8467	1472	0,9072
4 mm	1696	8465	1521	0,9009
Fenda	1277	8593	1674	0,9024

Avaliando-se os valores encontrados para a_1 , nota-se que:

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um decréscimo de 3% em relação ao valor de 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve um decréscimo de 8% em relação ao valor de 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um incremento de 105% no valor em relação ao de 3 mm;
- o vazamento com a fenda tem valor 21% menor que o de 3 mm;
- o vazamento com orifício de 1 mm foi o que obteve o maior valor de magnitude.

Ao analisar os valores para a_1 , constata-se que a tendência foi que o aumento do diâmetro causou a diminuição das magnitudes (1 mm para 2 mm e de 2 para 3 mm). Porém, a partir do vazamento de 3 mm, o aumento do orifício aumentou a magnitude obtida.

Em relação a b_1 :

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um decréscimo de 17 Hz em relação a 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve um decréscimo de 98 Hz em relação a 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um decréscimo de 2 Hz em relação a 3 mm;
- o vazamento com a fenda obteve valor superior em 11 Hz em relação a 1 mm;
- o vazamento com a fenda foi o que obteve o maior valor de frequência média.

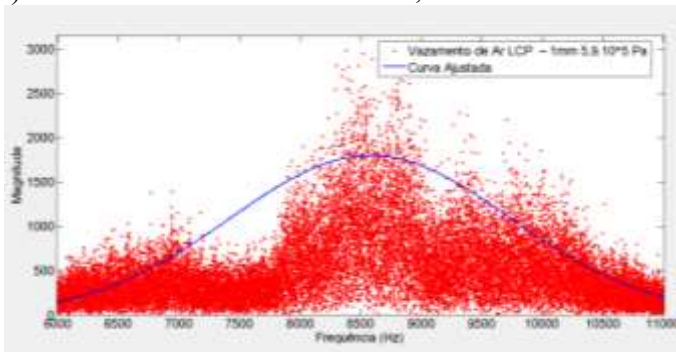
Os valores obtidos para b_1 evidenciam que o aumento do orifício de acarreta na diminuição dos valores das frequências médias. Comparando-se com os valores de magnitude anteriormente relatados tem-se que os sinais de 1 para 2 mm e de 2 para 3 mm ficaram menos intensos e com frequências médias menores. Já de 3 para 4 mm o sinal ficou mais intenso e com frequências médias menores.

Já em relação a constante c_1 os valores em ordem crescente são de 3 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm e a fenda.

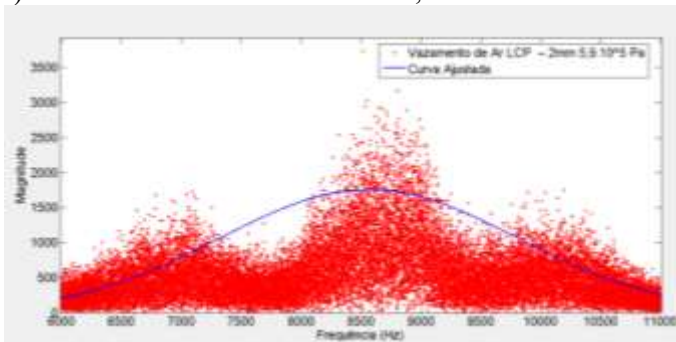
A Figura 44 apresenta as Gaussianas de primeira ordem ajustadas para os respectivos casos de vazamentos. Em relação aos ajustes realizados, para os casos de vazamento com orifício de 1 e 2 mm as Gaussianas de terceira ordem tiveram coeficientes de ajuste superiores em comparação com as de primeira ordem. Por outro lado, nos vazamentos de 3, 4 mm e a fenda os coeficientes de ajuste para as Gaussianas de primeira ordem foram superiores aos de terceira.

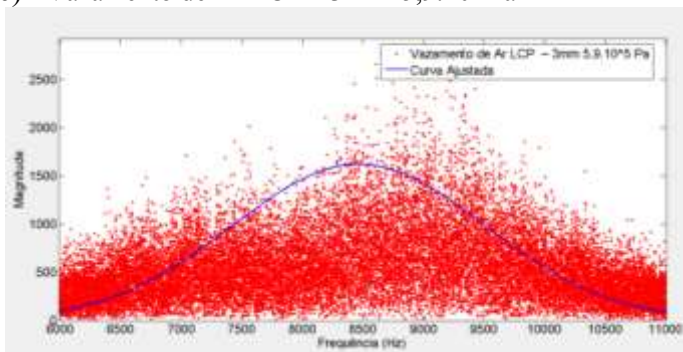
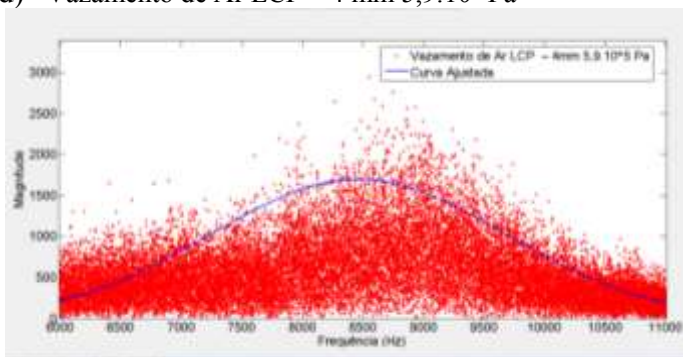
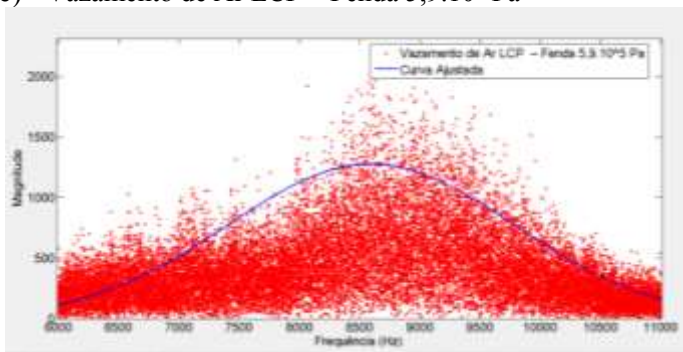
Figura 44 – Gaussianas de primeira ordem ajustadas para os vazamentos de ar com pressão de $5,9 \cdot 10^5$ Pa.

a) Vazamento de Ar LCP – 1 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa



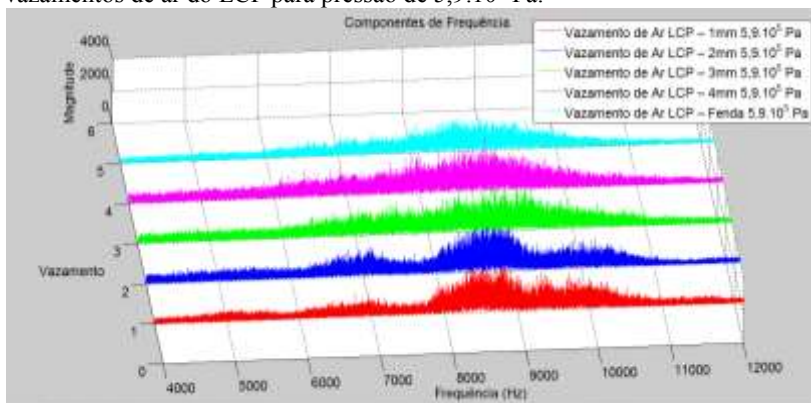
b) Vazamento de Ar LCP – 2 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pa



c) Vazamento de Ar LCP – 3 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pad) Vazamento de Ar LCP – 4 mm $5,9 \cdot 10^5$ Pae) Vazamento de Ar LCP – Fenda $5,9 \cdot 10^5$ Pa

Na Figura 45 são apresentados concomitantemente os casos de vazamento de ar nos quais foi utilizada a pressão interna do duto de $5,9 \cdot 10^5$ Pa. Através dela é possível observar as influências causadas pelo aumento no diâmetro do orifício de vazamento e na utilização da fenda. Essas influências foram detalhadas através das constantes a_1 , b_1 e c_1 e apresentadas anteriormente.

Figura 45 – Influência do diâmetro do orifício de vazamento nos espectros de vazamentos de ar do LCP para pressão de $5,9 \cdot 10^5$ Pa.



Com a realização dos experimentos anteriormente descritos foi possível analisar a também a influência do acréscimo da pressão interna no duto. Da Figura 46 até a 50 são apresentados os comparativos de um vazamento com o mesmo orifício, porém, com diferentes pressões.

Figura 46 – Influência da pressão nos espectros de vazamentos de ar do LCP para o orifício de vazamento de 1 mm.

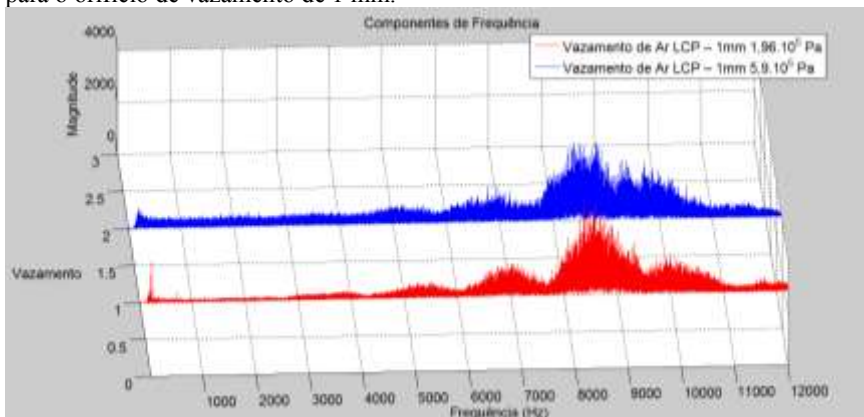


Figura 47 – Influência da pressão nos espectros de vazamentos de ar do LCP para o orifício de vazamento de 2 mm.

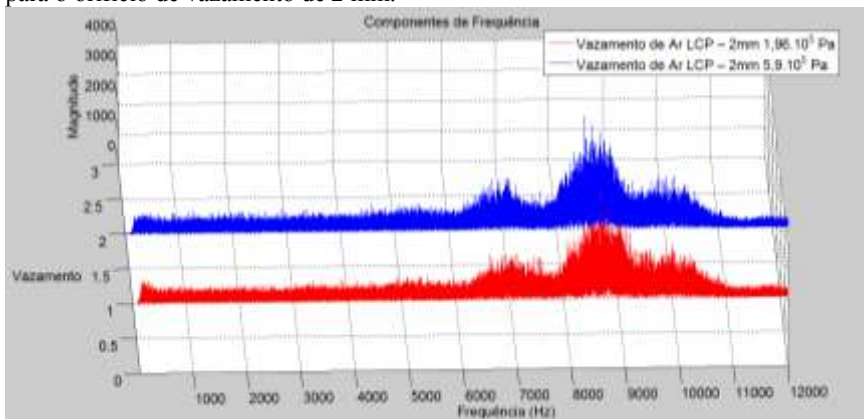


Figura 48 – Influência da pressão nos espectros de vazamentos de ar do LCP para o orifício de vazamento de 3 mm.

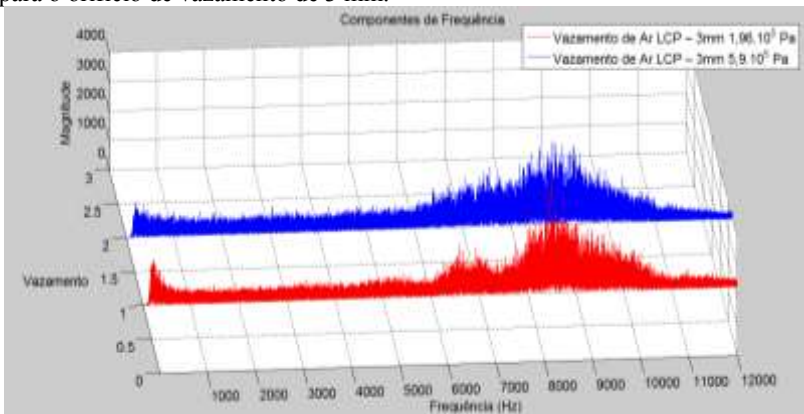


Figura 49 – Influência da pressão nos espectros de vazamentos de ar do LCP para o orifício de vazamento de 4 mm.

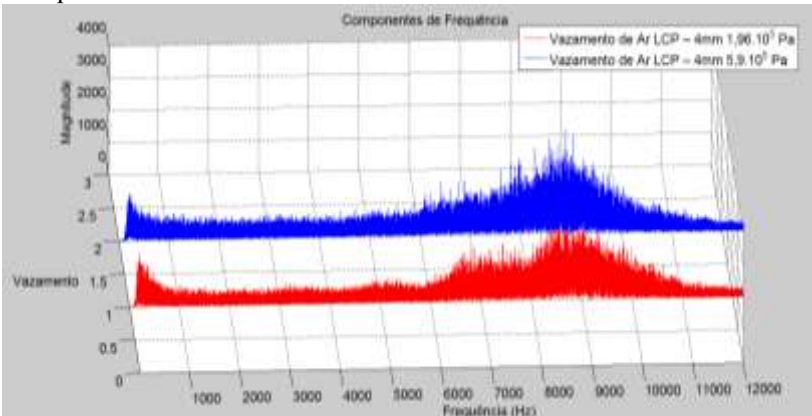
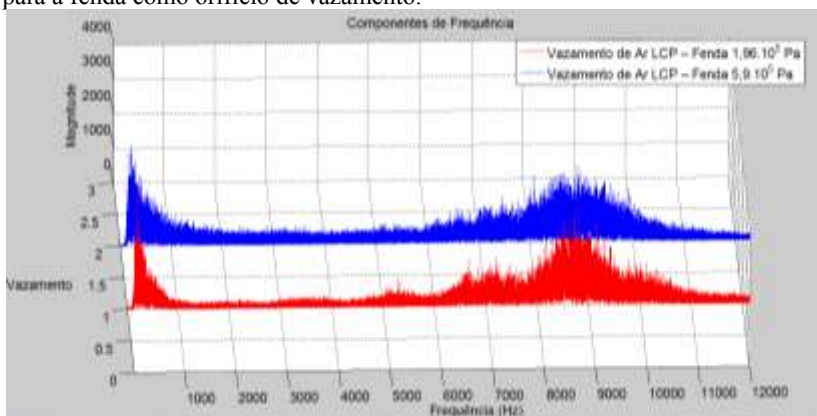


Figura 50 – Influência da pressão nos espectros de vazamentos de ar do LCP para a fenda como orifício de vazamento.



A Tabela 13 apresenta a influência provocada pelo aumento da pressão interna do duto na frequência média da região de interesse e o desvio padrão para cada um dos orifícios de vazamentos estudados. Houve claramente a tendência de ampliação das frequências médias e a diminuição do desvio padrão com o aumento da pressão.

Tabela 13 - Influência Provocada pelo Aumento de Pressão nos Sinais de Vazamentos Obtidos.

Orifício de Vazamento	Frequência Média da Região de Interesse	Desvio Padrão
1 mm	Aumento de 2 Hz	Diminuiu
2 mm	Aumento de 26 Hz	Aumentou
3 mm	Diminuição de 5 Hz	Diminuiu
4 mm	Aumento de 33 Hz	Diminuiu
Fenda	Aumento de 5 Hz	Aumentou

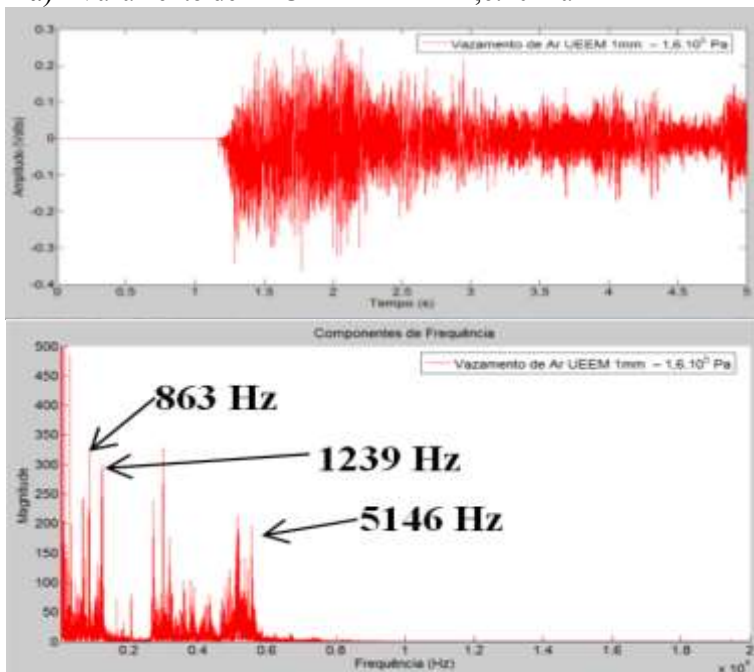
Conseqüentemente ao ser analisada a tendência dos resultados obtidos para os vazamentos de ar no LCP com pressão interna do duto de $1,96 \cdot 10^5$ e $5,9 \cdot 10^5$ Pa é possível afirmar que esse aumento de pressão acarretou no deslocamento das frequências médias para valores maiores acompanhado do aumento das magnitudes do sinal. Isso pode ser notado nas Figuras 40 e 45 nas quais fica evidente que o aumento do orifício e da pressão implicam o estreitamento da base da Gaussiana e também na elevação da magnitude do sinal. Com isso, a tendência seria a ocorrência de picos de frequência.

Novamente, após a realização dos estudos de vazamento de ar no LCP foram realizados testes na UEEM para a verificação da utilização da metodologia em um circuito fechado. A Figura 51 mostra os sinais em função do tempo com os respectivos espectrogramas de frequências obtidos com o uso da TRF para cada um dos orifícios circulares de vazamentos (1 mm, 2 mm, 3 mm e 4 mm) e para a fenda.

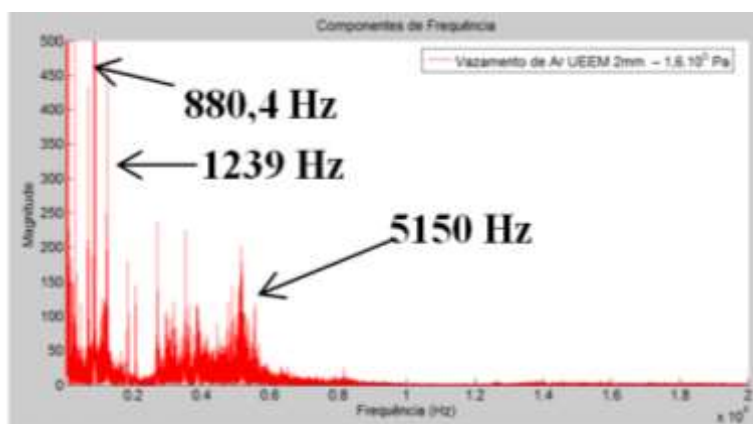
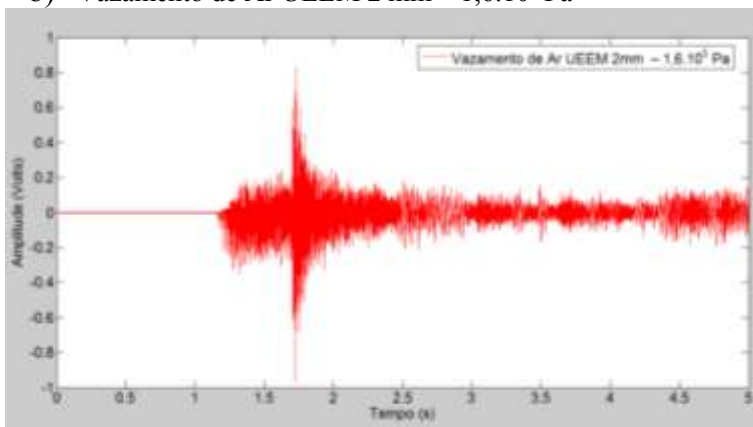
Pela análise dos sinais presentes na Figura 51 nota-se que assim que o vazamento inicia-se há um pico nos valores da amplitude e após há uma tendência de estabilização nesses valores. Mais uma vez é nítida a influência do diâmetro do orifício de vazamento na amplitude do sinal, conforme pode ser observado nos vazamentos de 3 mm e 4 mm. Para os vazamentos de 1, 2 mm e para a fenda as frequências máximas obtidas são inferiores a 8 kHz. Já nos vazamentos de 3 e 4 mm chegam a 16 e 20 kHz respectivamente.

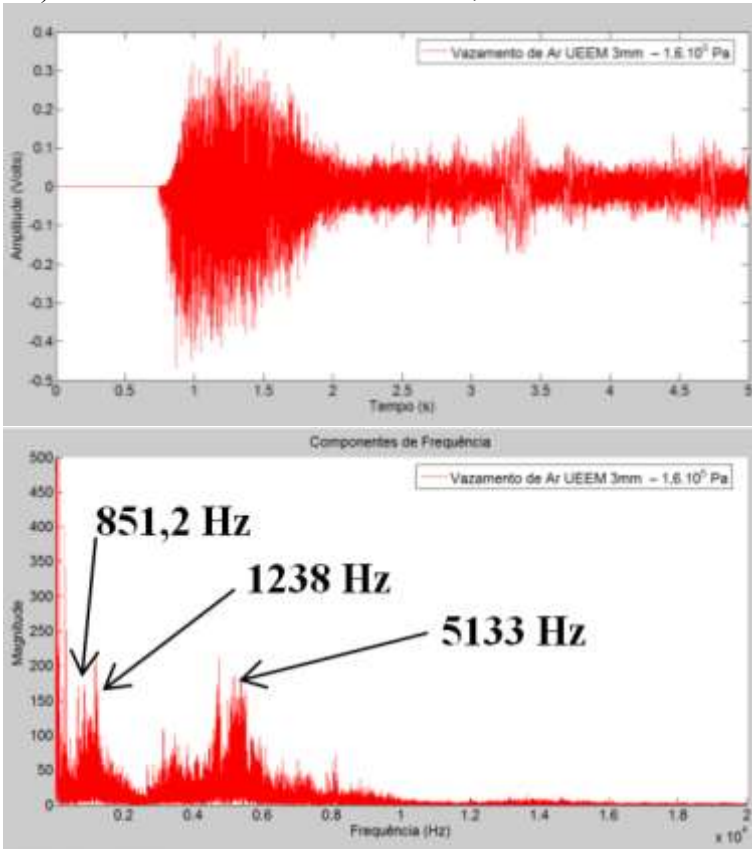
Figura 51 – Vazamentos de Ar realizados na UEEM: em a), b), c), d) e e) estão apresentados os sinais dos vazamentos (Amplitude x Tempo) e os respectivos espectros de frequência.

a) Vazamento de Ar UEEM 1 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa

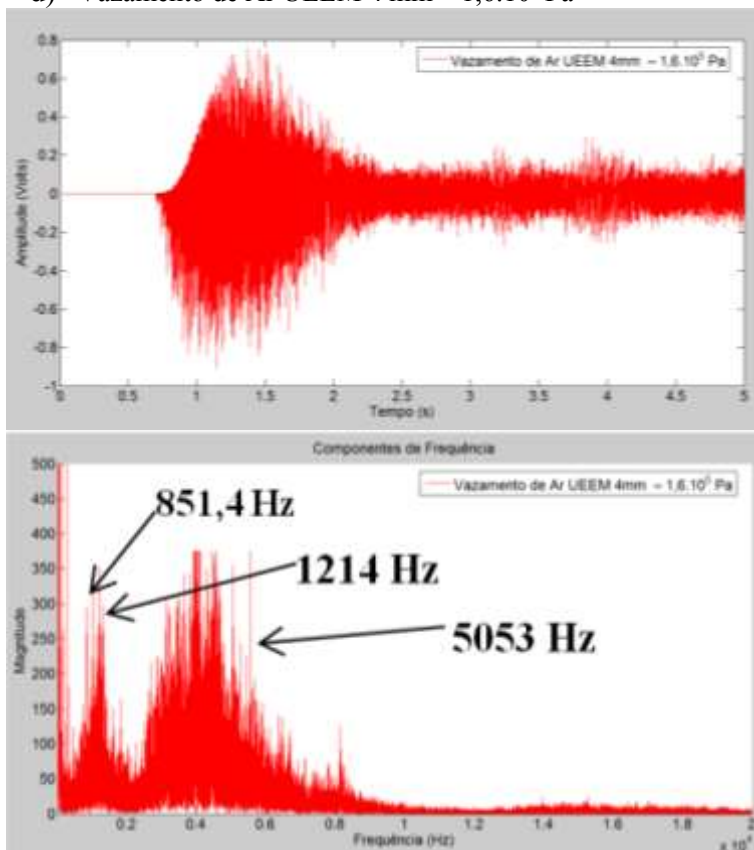


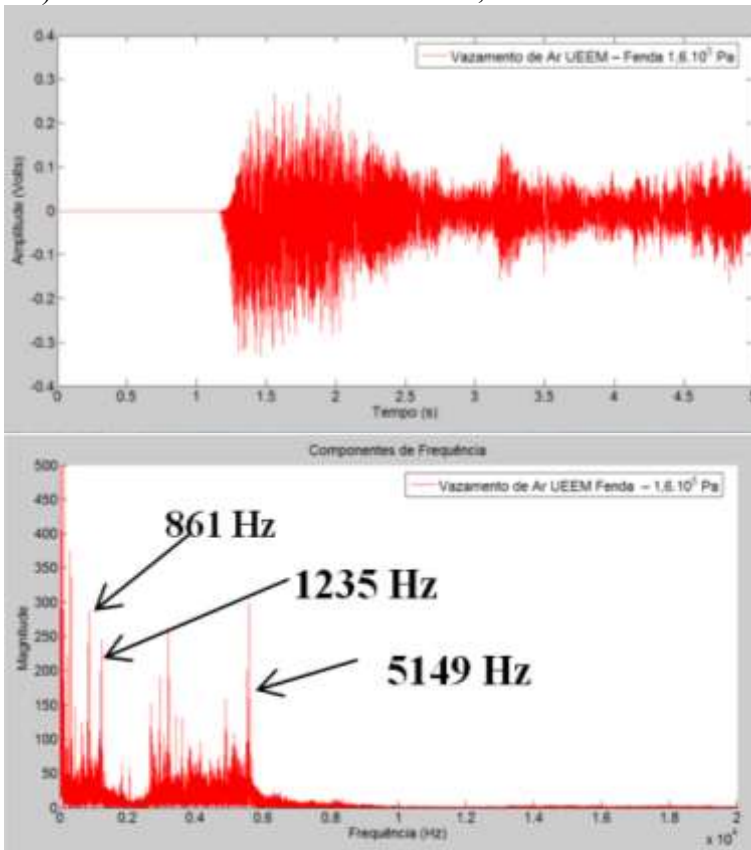
b) Vazamento de Ar UEEM 2 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



c) Vazamento de Ar UEEM 3 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa

d) Vazamento de Ar UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa

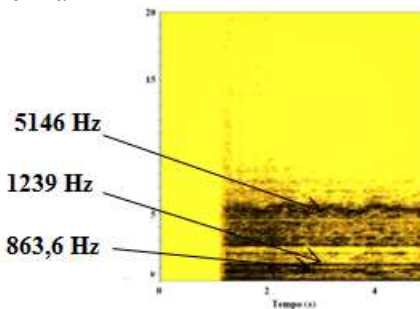


e) Vazamento de Ar UEEM Fenda – $1,6 \cdot 10^5$ Pa

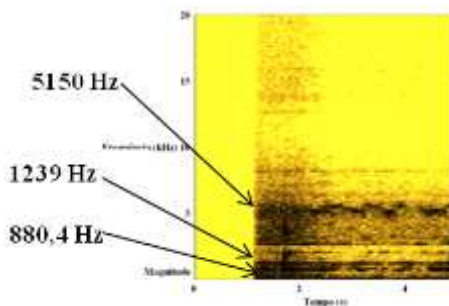
Na Figura 52 é apresentada a vista superior do espectro tempo-freqüência em três dimensões para todos os casos de vazamento de ar da UEEM. É possível notar pela análise dessa figura que, diferentemente do que ocorreram com os casos estudados de vazamento de ar no LCP, não há a presença de uma região de interesse, mas sim de picos de freqüência que aparecem em todos os casos. Nas Figuras 51 e 52, foram evidenciados esses picos de freqüências características.

Figura 52 – Diagramas tempo-frequência dos Vazamentos de Ar da UEEM de 1, 2, 3, 4 mm e da fenda com pressão interna de $1,6 \cdot 10^5$ Pa.

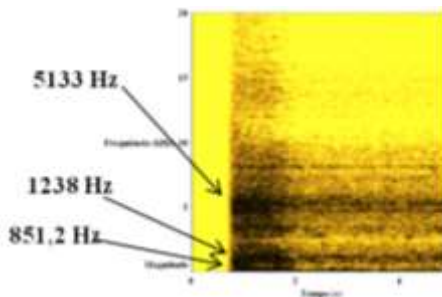
- a) Diagrama tempo-frequência do Vazamento de Ar UEEM – 1 mm $1,6 \cdot 10^5$ Pa



- b) Diagrama tempo-frequência do Vazamento de Ar UEEM – 2 mm $1,6 \cdot 10^5$ Pa

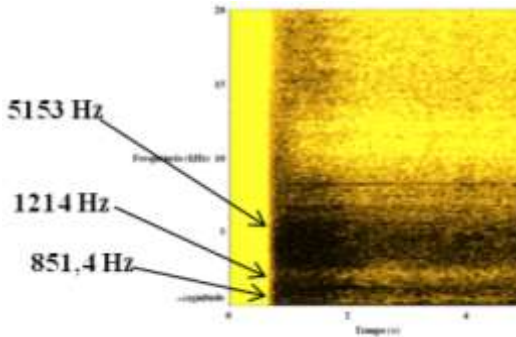


- c) Diagrama tempo-frequência do Vazamento de Ar UEEM – 3 mm $1,6 \cdot 10^5$ Pa

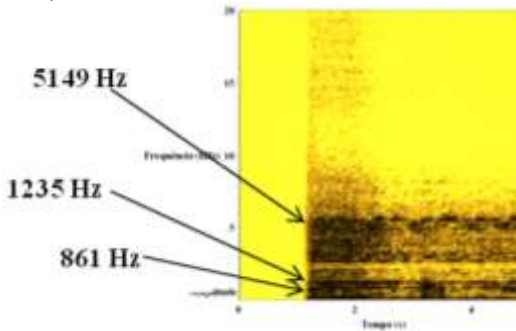


- d) Diagrama tempo-frequência do espectro do Vazamento de Ar

UEEM – 4 mm $1,6 \cdot 10^5$ Pa



e) Diagrama tempo-frequência do Vazamento de Ar UEEM – Fenda $1,6 \cdot 10^5$ Pa



Na Tabela 14 são apresentados os valores dos picos encontrados. Em relação ao primeiro pico de frequência nota-se que:

- do vazamento com orifício de 1 mm para o de 2 mm houve um acréscimo de 16,8 Hz em relação a 1 mm;
- do vazamento com orifício de 2 mm para o de 3 mm houve um decréscimo de 29,2 Hz em relação a 2 mm;
- do vazamento com orifício de 3 mm para o de 4 mm houve um acréscimo de 0,2 Hz em relação a 3 mm;
- o vazamento com a fenda obteve valor superior em 2,6 Hz em relação a 1 mm;
- o vazamento de 2 mm foi o que obteve o maior valor de frequência.

Já em relação ao segundo pico de frequência houve pouca dispersão em relação ao valor apenas 24 Hz separam o valor do menor pico (4 mm) em relação aos de maiores picos (1 e 2 mm).

O terceiro pico foi em relação aos vazamentos de 1, 2, 3, 4 mm e a fenda tiveram valores bastante próximos, com apenas 20 Hz de diferença.

Tabela 14 - Valores dos picos de frequência encontrados para Vazamento de Ar UEEM.

	Frequência 1 (Hz)	Frequência 2 (Hz)	Frequência 3 (Hz)
1 mm	863,6	1239	5146
2 mm	880,4	1239	5150
3 mm	851,2	1238	5133
4 mm	851,4	1214	5153
5 mm	861,0	1235	5149

O fato de aparecerem picos de frequência ao invés de regiões de frequências possibilita a detecção com mais facilidade uma vez que seria necessário monitorar uma região de frequências mais restrita para a determinação da ocorrência ou não de vazamentos. Mais uma vez vale salientar que as diferenças encontradas em relação às características dos sinais de vazamentos apresentados no LCP e na UEEM não significam que o método utilizado nesse trabalho não seja robusto ao ponto de não poder ser estendido para outros locais. Ocorre que deveriam ser realizados ajustes que dependeriam do tipo de fluido a ser transportado e também das próprias características inerentes às redes de dutos.

Em relação aos parâmetros estudados foi possível notar que o aumento do diâmetro do orifício de vazamento sempre que se passava do orifício de 1 mm para o de 2 mm a frequência média ou a característica aumentava. Porém do orifício de 2 mm para 3 mm essas frequências diminuíram em todos os casos. Já de 3 mm para 4 mm elas tendiam a aumentar, houve apenas o caso com pressão de $5,9 \cdot 10^5$ Pa em que houve um decréscimo de 2 Hz. Já em relação à utilização da fenda como orifício de vazamento, para as duas pressões analisadas os valores de frequência média encontradas aproximaram-se do orifício de 1 mm. Em relação ao aumento de pressão em todos os casos houve um deslocamento da frequência média para valores maiores, exceto para os orifícios de 3 e 4 mm. Esse aumento de pressão ainda provocou em

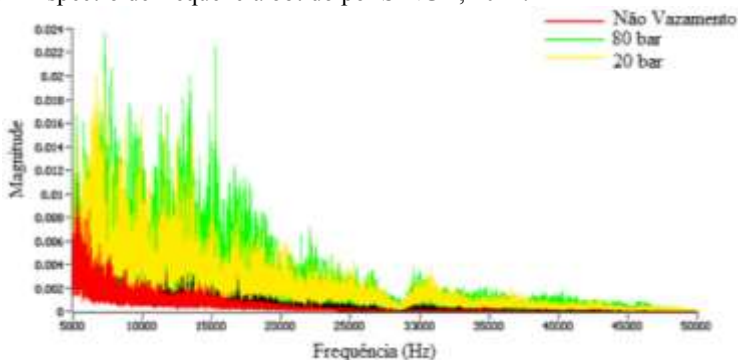
todos os casos o aumento da magnitude do sinal, ou seja, quanto maior a variação de pressão maior será a vibração causada no duto.

Além de todos os resultados obtidos nesse trabalho, faz-se necessário compará-los aos já existentes na literatura. Em relação ao trabalho de GARCIA, 2010 alguns pontos em comum puderam ser observados. Por exemplo, as frequências obtidas para os vazamentos de ar foram superiores às de vazamentos de água devido principalmente às características do fluido e também da atenuação do sinal. Outro aspecto é que sempre que a pressão era aumentada a intensidade do sinal aumentava consideravelmente o que facilitava a identificação do vazamento.

Já em seu trabalho SINGH, 2011 também empregou o método acústico para a detecção de vazamentos de líquido refrigerador utilizado em reatores nucleares. Para isso, foi utilizado vapor de água na parte experimental em substituição ao líquido refrigerador. O ruído do vazamento era capturado por dois microfones padrão adequados para a faixa acústica medida. Um microfone foi colocado a 1m de distância da fonte de vazamento e o outro foi colocado em 15m. Ele utilizou um sistema de aquisição dinâmica de dados foi integrado utilizando-se de produtos que têm resolução de 24 bits ADC e DAC, 118 dB de gama dinâmica, duas saídas analógicas simultaneamente atualizados em até 204,8 kHz, um software configurável AC/ DC acoplado a um condicionador de sinais IEPE, seis ajustes de ganho para faixas de entrada de $\pm 316\text{mV}$ para 42,4 V e duas entradas analógicas simultaneamente amostrados em até 204,8 kHz.

A Figura 53 exibe o espectro de frequência obtido em um caso de não vazamento e quando a pressão interna do sistema era ajustada em 20 e 80 bar. Nota-se que, a variação da pressão interna nos dutos não cria uma “nova assinatura” para os casos de vazamentos, isso demonstra uma conformidade entre ambos os trabalhos mesmo tendo sido empregados em processos distintos.

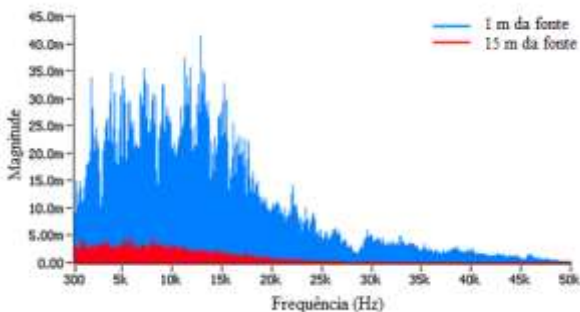
Figura 53 – Espectro de frequência obtido por SINGH, 2011.



Fonte: SINGH, 2011.

Na figura 54, os espectros de frequências obtidos com os microfones distantes a 1 e 15 m evidenciam o comportamento semelhante ao apresentado neste trabalho. Isso corrobora o fato de que a técnica de detecção de vazamentos acústica é bastante versátil e com diversas aplicações industriais.

Figura 54 - Espectro de frequência obtido por SINGH, 2011.



Fonte: SINGH, 2011.

4.3 Casos de Não Vazamento

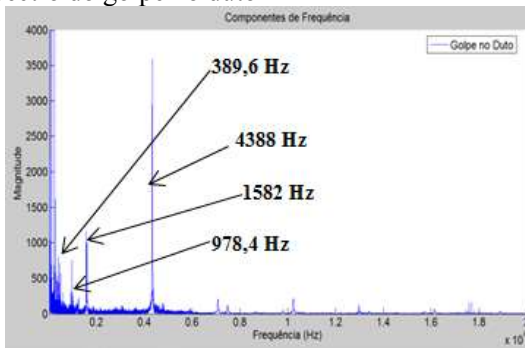
É comum que, durante a operação de transporte de fluidos via dutos, ocorram eventos de não vazamento, mas que também são

geradores de vibrações, por isso faz-se também necessário o estudo desses casos e a análise das frequências geradas por eles.

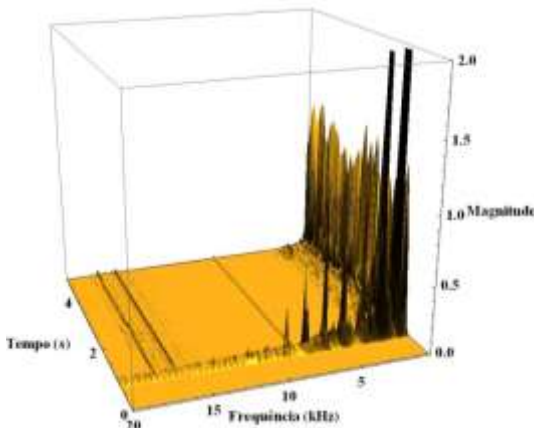
Na Figura 55 é apresentado o espectro de tempo-frequência em três dimensões, gerado por um golpe que foi desferido com um objeto metálico contra o duto. Nota-se a presença de alguns picos de frequência, os quais foram destacados na figura, que duram por apenas alguns milésimos de segundos. Vale ressaltar que as frequências entre 16 e 19 kHz foram geradas devido a ruídos dos cabos utilizados nos experimentos.

Figura 55 – Espectro do Golpe no Duto e a vista 3D tempo-frequência.

a) Espectro do golpe no duto



b) Vista lateral do espectro do golpe no duto



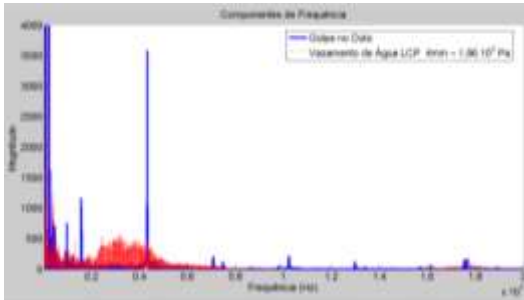
Para analisar todos os casos de vazamento anteriormente estudados foram comparados todos eles com o espectro gerado pelo golpe. Na Figura 54 são apresentados os comparativos para os casos de vazamento de água e de ar com orifício de vazamento de 4 mm tanto no Laboratório de Controle de Processos quanto na Unidade Experimental de Escoamento Multifásico em relação ao golpe no duto.

Em relação ao vazamento de água do LCP com a pressão ajustada em $1,96 \cdot 10^5$ Pa, cuja frequência média encontrada foi de 3706 Hz, fica evidente a distinção entre os dois espectros, conforme a Figura 56 a). Para o vazamento com a pressão de $5,9 \cdot 10^5$ Pa, cuja frequência média encontrada foi de 4265 Hz, novamente fica evidente a distinção entre os dois espectros, conforme a Figura 56 b). No caso do vazamento de água na UEEM, o pico característico encontrado foi de 988,6 Hz. Nesses dois últimos casos houve uma diferença de 123 e 10,2 Hz, respectivamente, entre as frequências médias obtidas e os picos presentes no golpe de frequências 4388, e 978,4 Hz. No caso da instalação do sistema de detecção, essas frequências não gerariam falsos alarmes, pois os demais picos característicos do golpe não estariam presentes, além do fato de eles durarem poucos milésimos de segundos, diferentemente, conforme foi apresentado anteriormente, dos picos característicos dos vazamentos que são estacionários.

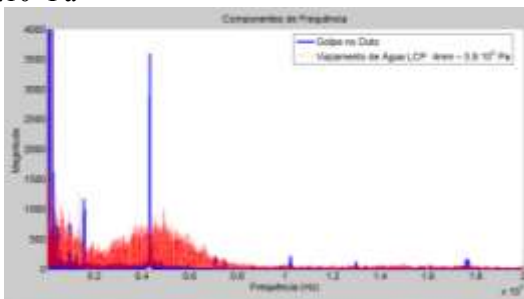
Já em relação aos vazamentos de ar do LCP, as frequências médias encontradas para as pressões de $1,96 \cdot 10^5$ e $5,9 \cdot 10^5$ Pa foram, respectivamente, de 8498 e 8465 Hz; muito acima dos picos característicos do golpe. Em relação ao caso da UEEM, as frequências características foram de 851,4, 1214 e 5053 Hz as quais também se distanciam bastante dos picos do golpe.

Figura 56 – Golpe no duto *versus* Casos de vazamento.

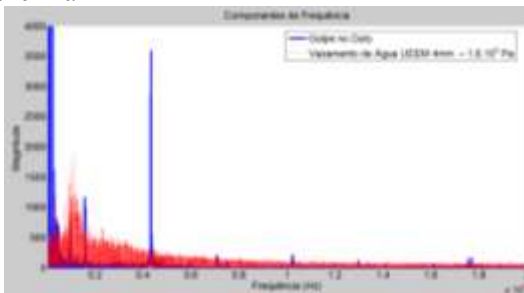
- a) Golpe no duto *versus* Vazamento de Água LCP 4 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa



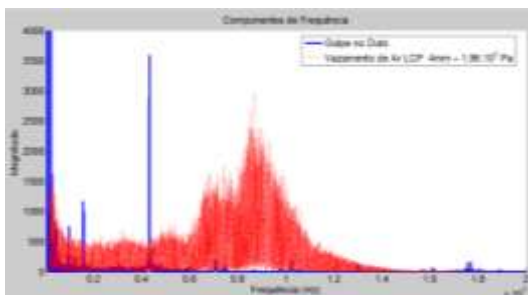
- b) Golpe no duto *versus* Vazamento de Água LCP 4 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa



- c) Golpe no duto *versus* Vazamento de Água UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa

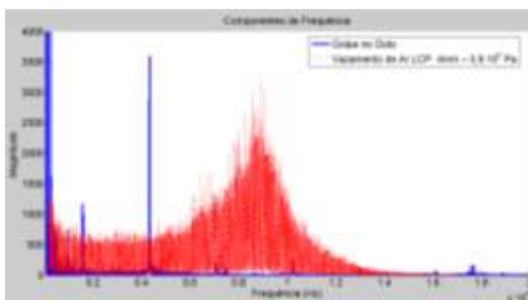


- d) Golpe no duto *versus* Vazamento de Ar LCP 4 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa

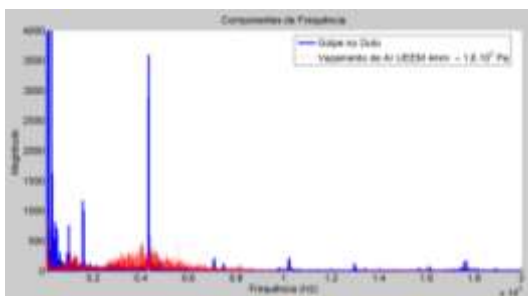


- e) Golpe no duto *versus* Vazamento de Ar LCP 4 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa

f)



- g) Golpe no duto *versus* Vazamento de Ar UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa

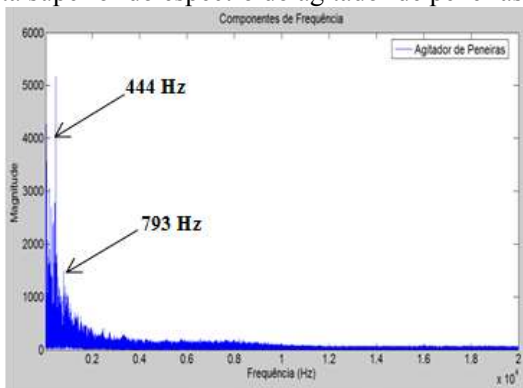


A Figura 57 mostra o espectro de frequência e a sua vista superior em três dimensões gerado pelo agitador de peneiras. Nota-se a existência de dois picos, 444 e 793 Hz, os quais permanecem presentes durante todo o período em que foi captado o sinal. Um fato interessante

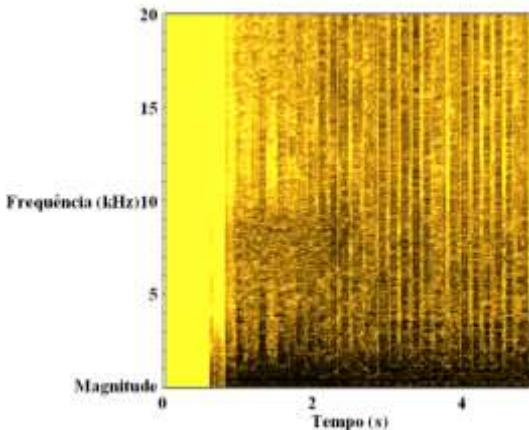
mostrado na vista superior do espectro é que durante vários instantes não consecutivos são captadas todas as frequências que o sistema de aquisição é capaz de medir.

Figura 57 – Espectro oriundo do Agitador de Peneiras e o respectivo diagrama tempo-frequência.

a) Vista superior do espectro do agitador de peneiras



b) Vista superior do espectro do agitador de peneiras

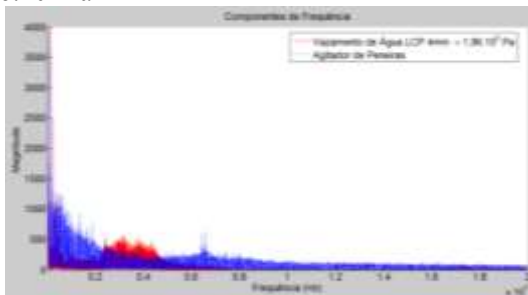


Na Figura 58 são apresentadas as comparações entre os espectros dos casos de vazamentos e do agitador de peneiras. Conforme relatado anteriormente, nenhum dos dois picos característicos do

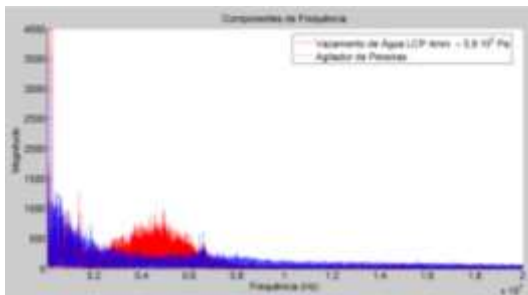
agitador se aproxima das frequências características dos vazamentos. Portanto, seria possível a distinção entre esses sinais.

Figura 58 – Agitador de peneiras *versus* Casos de vazamento.

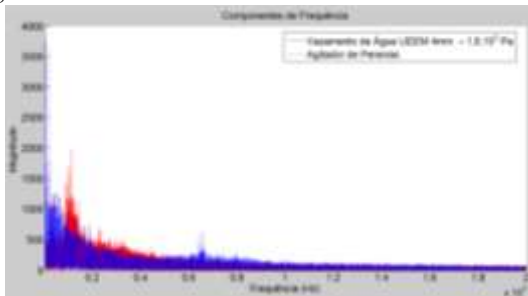
- a) Agitador de Peneiras *versus* Vazamento de Água LCP 4 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa



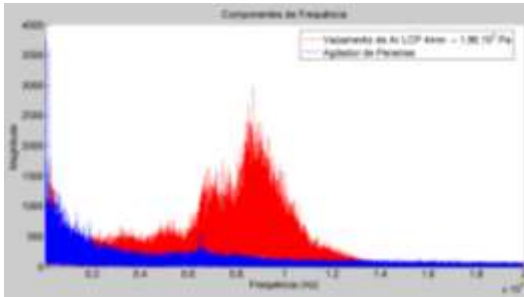
- b) Agitador de Peneiras *versus* Vazamento de Água LCP 4 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa



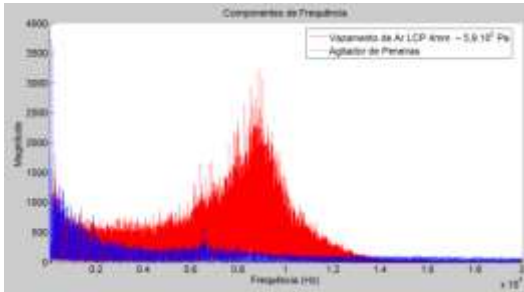
- c) Agitador de Peneiras *versus* Vazamento de Água UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



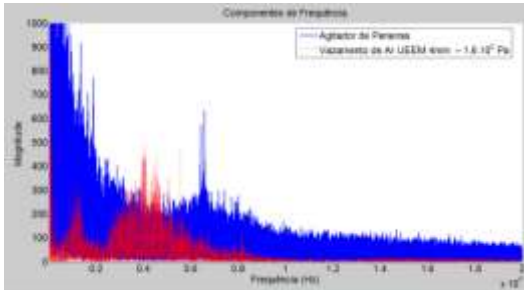
- d) Agitador de Peneiras *versus* Vazamento de Ar LCP 4 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa



- e) Agitador de Peneiras *versus* Vazamento de Ar LCP 4 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa



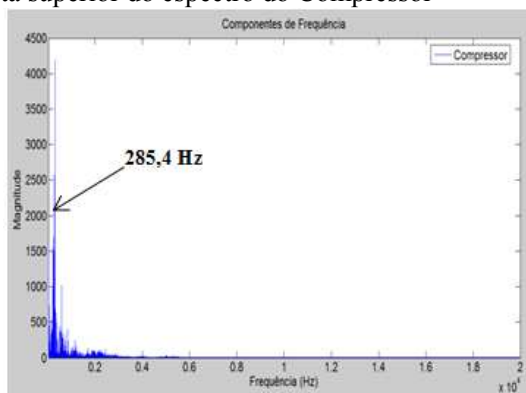
- f) Agitador de Peneiras *versus* Vazamento de Ar UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



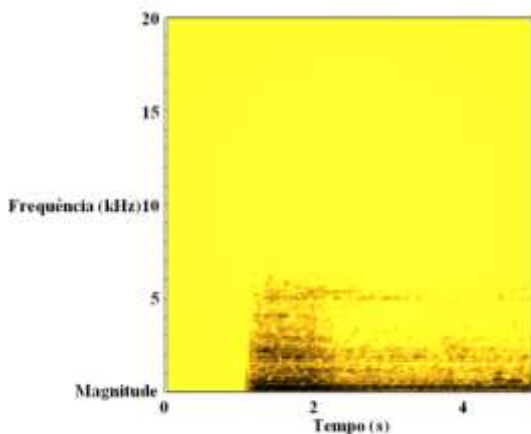
Na Figura 59 há o espectro de frequência e a sua vista superior em três dimensões gerado pelo compressor. Nota-se a existência do pico de 285,4 Hz o qual permanece presente durante todo o período em que foi captado o sinal. É possível notar também que durante poucos instantes algumas frequências aparecem no espectro, porém elas tendem a declinar suas magnitudes rapidamente e praticamente desaparecem. Por esse motivo elas não foram classificadas como características do compressor.

Figura 59 – Espectro do Compressor e o respectivo diagrama tempo-frequência.

a) Vista superior do espectro do Compressor



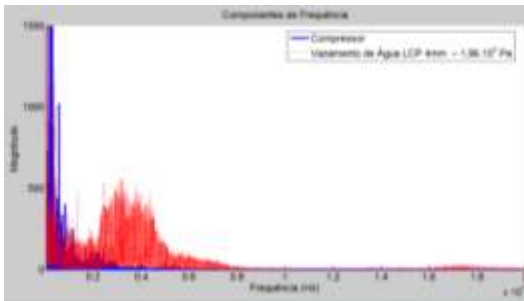
b) Vista superior do espectro do Compressor



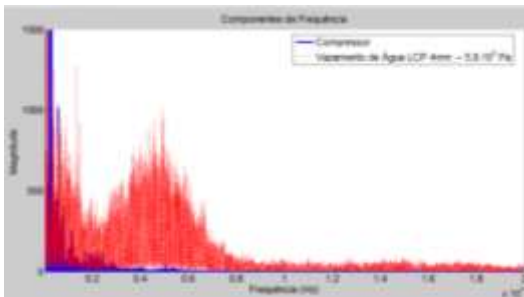
Na Figura 60 são apresentadas as comparações entre os espectros dos casos de vazamentos e do compressor. Mais uma vez, a frequência característica desse caso de não vazamento se distancia significativamente dos valores obtidos para os vazamentos. Novamente há uma clara distinção entre os fenômenos.

Figura 60 – Compressor *versus* Casos de vazamento.

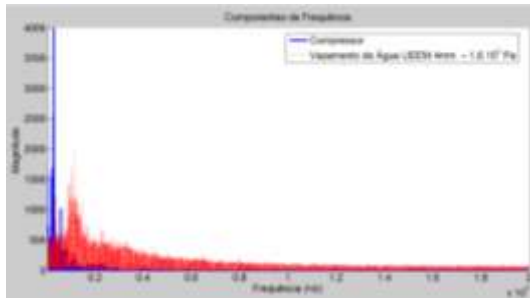
- a) Compressor *versus* Vazamento de Água LCP 4 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa



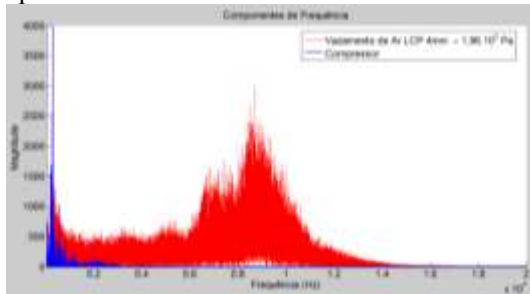
- b) Compressor *versus* Vazamento de Água LCP 4 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa



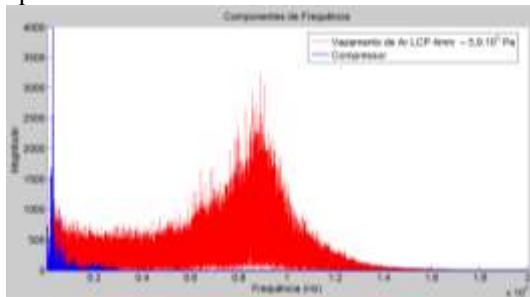
- c) Compressor *versus* Vazamento de Água UEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



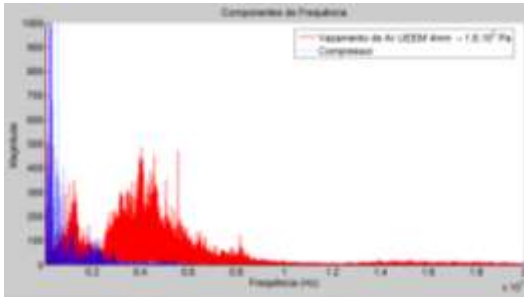
- d) Compressor *versus* Vazamento de Ar LCP 4 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa



- e) Compressor *versus* Vazamento de Ar LCP 4 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa



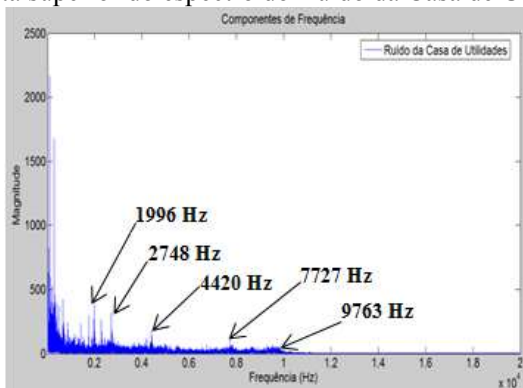
f) Compressor *versus* Vazamento de Ar UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



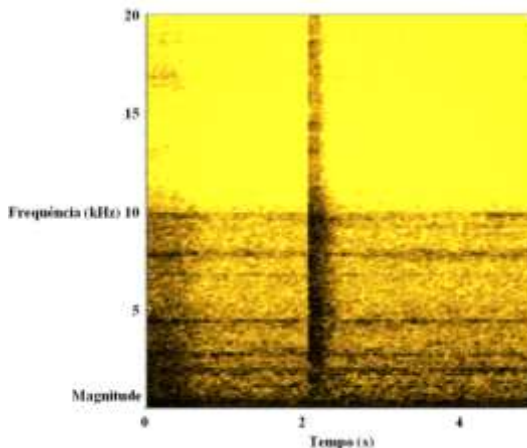
A Figura 61 mostra o espectro de frequência e a sua vista superior em três dimensões gerado pelo ruído da casa de utilidades. Nessa casa há a presença de vários equipamentos como compressor, bomba e também de sensores os quais estavam em operação quando foi realizada a captação do sinal proveniente desse ambiente. Nota-se a existência de cinco picos os quais estão evidenciados na figura. No instante de 2,1 s de captação do sinal há a formação de um rastro ao longo das frequências. Isso ocorreu devido ao estalo do acionamento de um dos sensores presentes na casa de utilidades.

Figura 61 – Espectro do Ruído da Casa de utilidades e o respectivo diagrama tempo-frequência.

a) Vista superior do espectro do Ruído da Casa de Utilidades



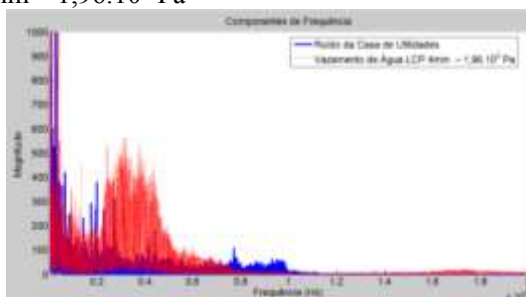
b) Vista superior do espectro do Ruído da Casa de Utilidades



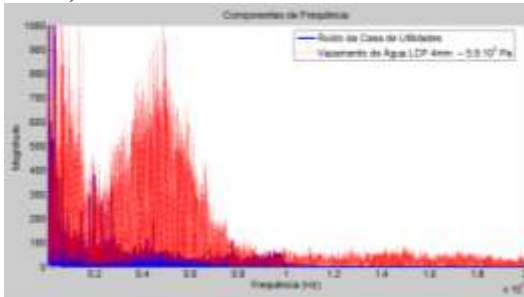
Na Figura 62 são apresentadas as comparações entre os espectros dos casos de vazamentos e do ruído da casa de utilidades. Conforme já relatado anteriormente, em nenhum dos casos há a proximidade das frequências características dos vazamentos com as encontradas para esse caso de não vazamento.

Figura 62 – Ruído da casa de utilidades *versus* Casos de vazamento.

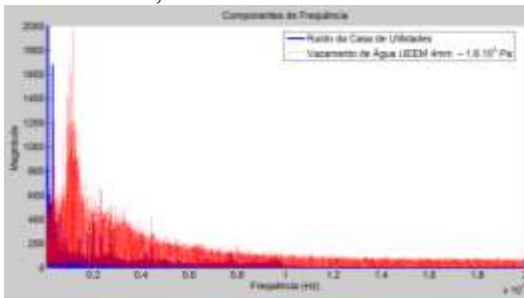
a) Ruído da Casa de Utilidades *versus* Vazamento de Água LCP 4 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa



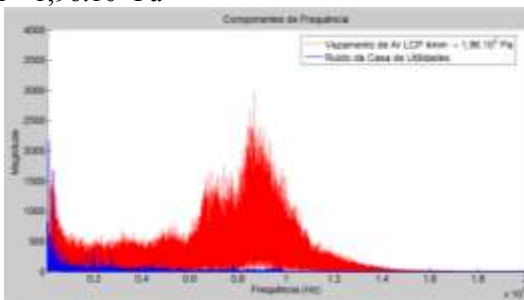
- b) Ruído da Casa de Utilidades *versus* Vazamento de Água LCP 4 mm – $5,9.10^5$ Pa



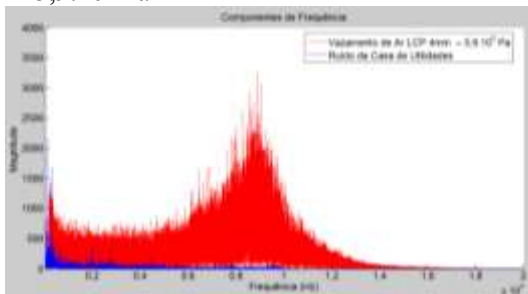
- c) Ruído da Casa de Utilidades *versus* Vazamento de Água UEEM 4 mm – $1,6.10^5$ Pa



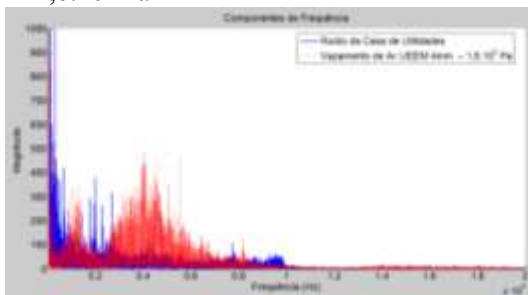
- d) Ruído da Casa de Utilidades *versus* Vazamento de Ar LCP 4 mm – $1,96.10^5$ Pa



- e) Ruído da Casa de Utilidades *versus* Vazamento de Ar LCP 4 mm – $5,9 \cdot 10^5$ Pa



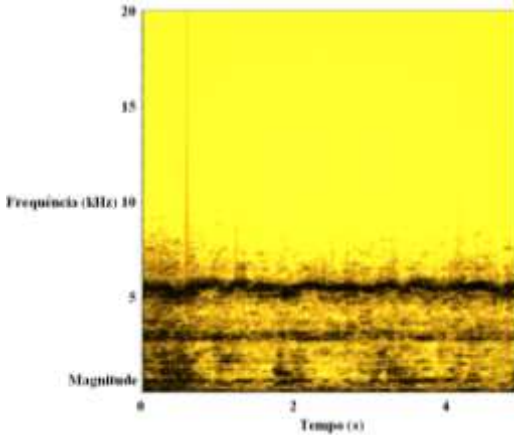
- f) Ruído da Casa de Utilidades *versus* Vazamento de Ar UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



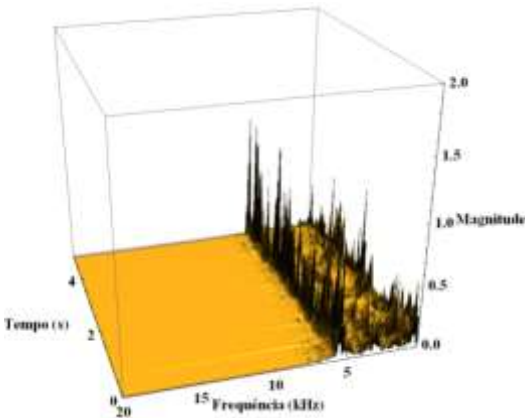
Na Figura 63 o espectro de frequência em três dimensões para a abertura da válvula de admissão de ar comprimido na rede da UEEM é apresentado. Foram realizados dois testes, o primeiro com o microfone fora do duto, distante a 50 cm e o outro com o microfone fixo no duto.

Figura 63 – Espectro tempo-frequência em 3d da abertura da válvula para entrada de ar com microfone distante a 50 cm do duto e com ele fixo. Em a) e c) têm-se as vistas superiores e em b) e d) as vistas laterais.

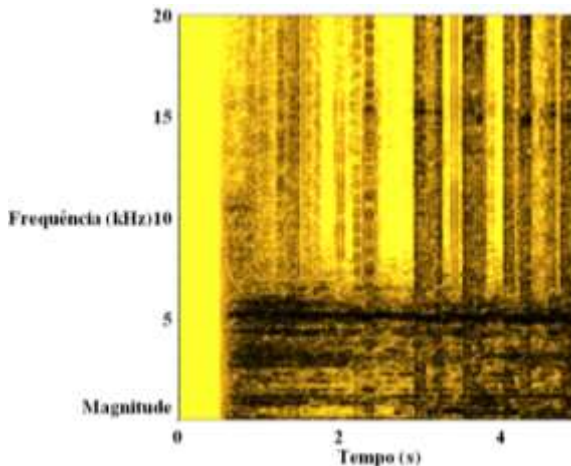
- a) Espectro tempo-frequência da abertura da válvula para entrada de ar com microfone distante a 50 cm do duto



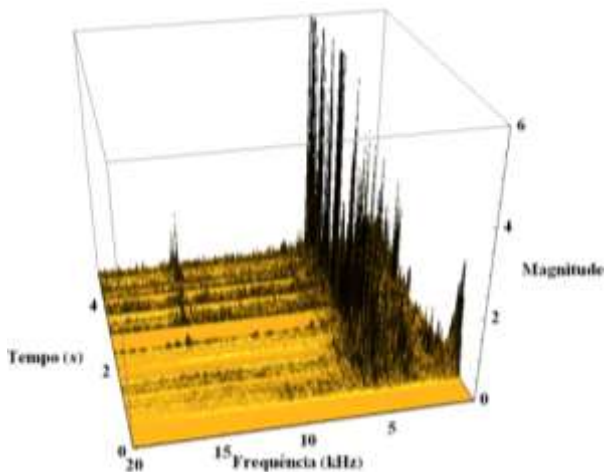
- b) Espectro tempo-frequência em 3d da abertura da válvula para entrada de ar com microfone distante a 50 cm do duto



- c) Espectro tempo-frequência da abertura da válvula para entrada de Ar com Microfone fixo no duto



- d) Espectro tempo-frequência da abertura da válvula para entrada de ar com microfone fixo no duto

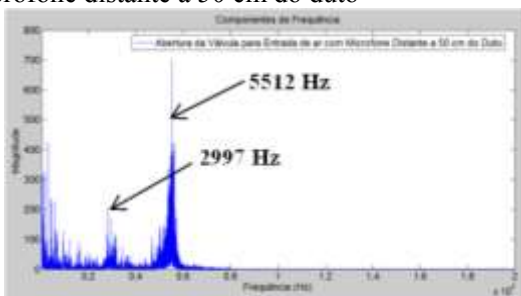


Na Figura 64 há o espectro de frequência para esses dois casos. Analisando-se em conjunto as Figuras 61 e 62 é possível notar a presença de duas frequências características para cada caso. Esse fato evidencia a influência da atenuação dos sinais. No primeiro caso, o sinal gerado é atenuado tanto pelo próprio casco do duto quanto pelo ar e no

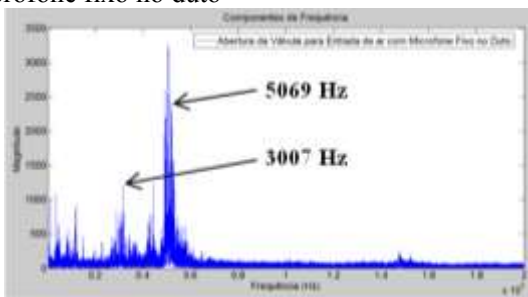
segundo caso há apenas a atenuação do casco. Quando o microfone fica suspenso no ar não aparecem frequências superiores a 10 kHz e isso ocorre quando ele está fixo no duto. Em contrapartida, quando o microfone fica fixo no duto a intensidade do sinal gerado é muito maior do que quando ele está no ar.

Figura 64 – Espectro de frequência da Abertura da válvula para entrada de ar com microfone distante a 50 cm do duto e com ele fixo.

- a) Espectro da Abertura da válvula para entrada de ar com microfone distante a 50 cm do duto



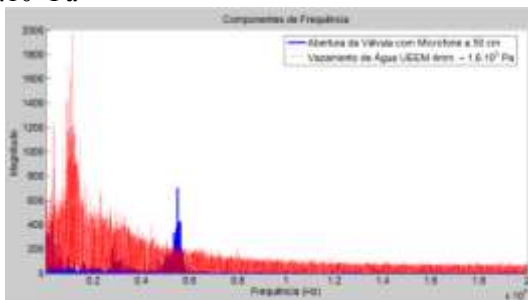
- b) Espectro da Abertura da válvula para entrada de ar com microfone fixo no duto



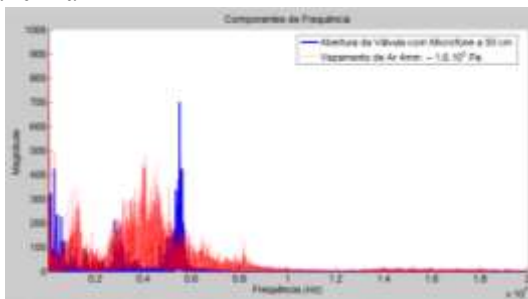
Na Figura 65, há a comparação entre esses casos de não vazamento com os de vazamento de ar e água.

Figura 65 – Abertura de válvula para entrada de ar *versus* Casos de vazamento.

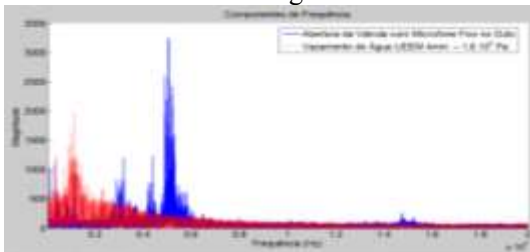
- a) Abertura da válvula para entrada de ar com microfone distante a 50 cm do duto *versus* Vazamento de Água UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



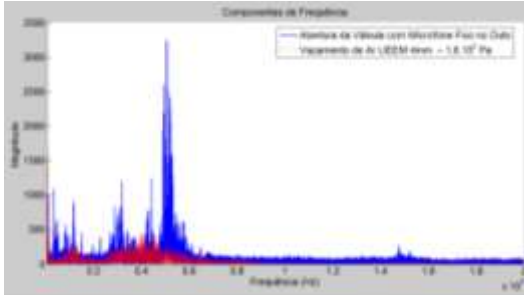
- b) Abertura da válvula para entrada de ar com microfone distante a 50 cm do duto *versus* Vazamento de Ar UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



- c) Abertura da válvula para entrada de ar com microfone fixo no duto *versus* Vazamento de Água UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



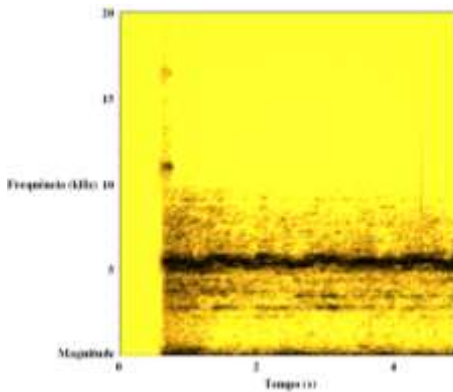
- d) Abertura da válvula para entrada de ar com microfone fixo no duto *versus* Vazamento de Ar LCP 4 mm – $1,96 \cdot 10^5$ Pa



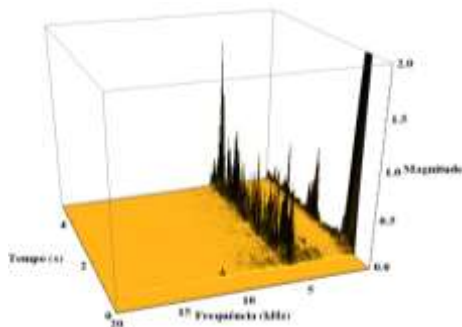
Na Figura 66 é apresentado o espectro de frequência em três dimensões para o escoamento de ar comprimido na rede da UEEM. Foram realizados dois testes, o primeiro com o microfone fora do duto, distante a 50 cm, e o outro com o microfone fixo no duto.

Figura 66 – Diagramas tempo-frequência do escoamento de ar com microfone distante a 50 cm do duto e com ele fixo.

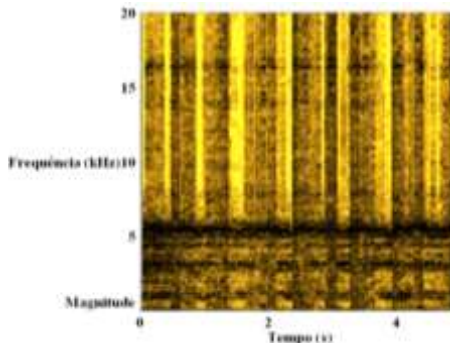
- a) Espectro tempo-frequência do escoamento de ar com microfone a 50 cm do duto



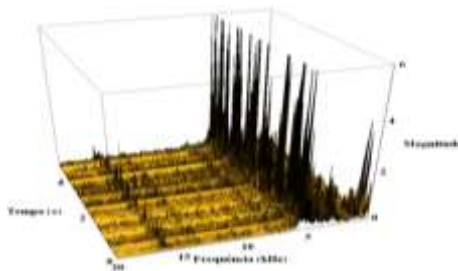
- b) Espectro tempo-frequência em 3D do escoamento de ar com microfone a 50 cm do duto



- c) Espectro tempo-frequência em 3D do Escoamento de ar com microfone fixo no duto



- d) Espectro tempo-frequência em 3D do escoamento de ar com microfone fixo no duto

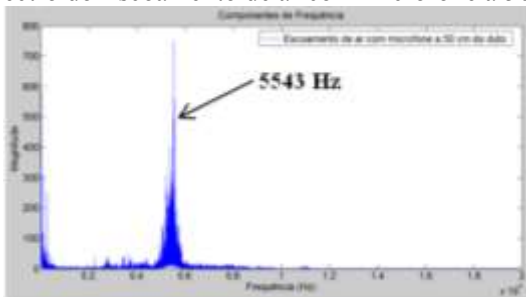


Na Figura 67 o espectro de frequência é exibido para esses dois casos. Analisando-se em conjunto as Figuras 64 e 65 é possível notar a presença de uma frequência característica para o primeiro caso e de três para o segundo. Mais uma vez, devido à atenuação do sinal, quando o

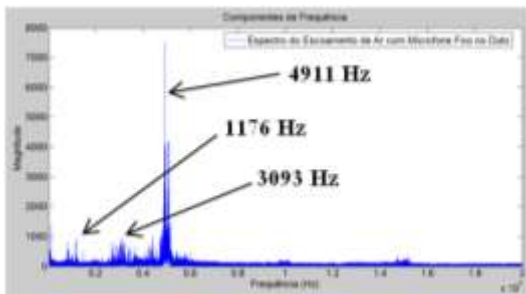
microfone fica suspenso no ar, as frequências superiores a 10 kHz não aparecem. Porém, quando o microfone fica fixo no duto, as magnitudes alcançadas pelo sinal gerado são muito maiores do que quando ele está no ar.

Figura 67 – Espectro de frequência do Escoamento de ar com microfone distante a 50 cm do duto e com ele fixo.

a) Espectro do Escoamento de ar com microfone a 50 cm do duto



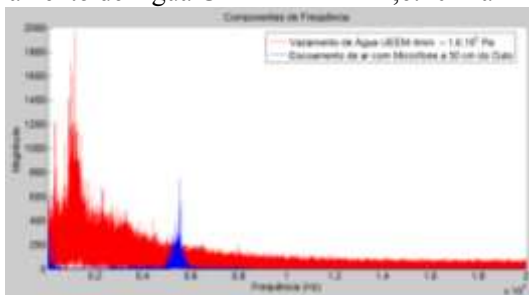
b) Espectro do Escoamento de ar com microfone fixo no duto



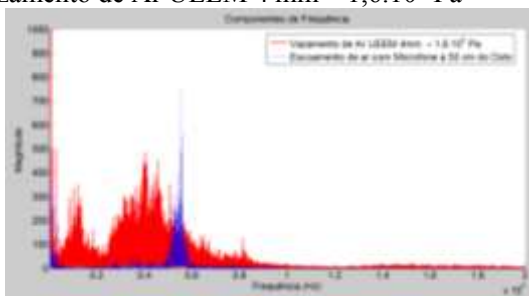
Na Figura 68, há a comparação entre esses casos de não vazamento com os de vazamento de ar e água.

Figura 68 – Escoamento de ar *versus* Casos de vazamento.

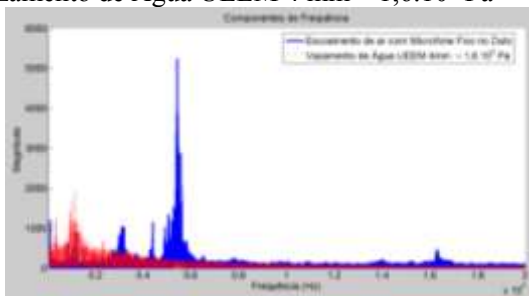
- a) Escoamento de ar com microfone a 50 cm do duto *versus* Vazamento de Água UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



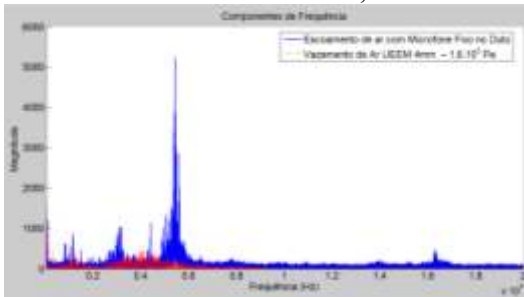
- b) Escoamento de ar com microfone a 50 cm do duto *versus* Vazamento de Ar UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



- c) Escoamento de ar com microfone fixo no duto *versus* Vazamento de Água UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



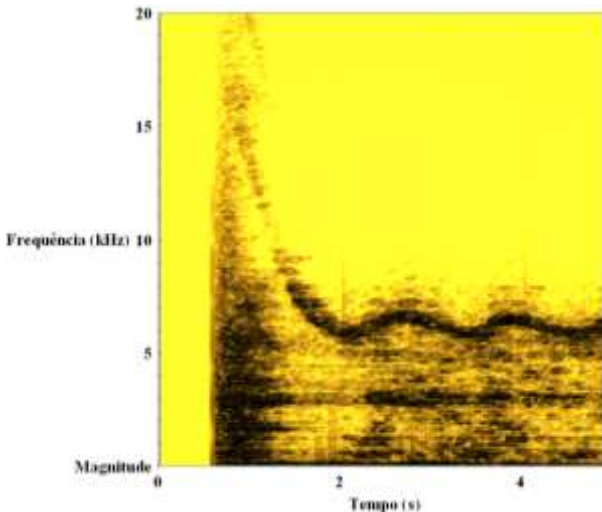
- d) Escoamento de ar com microfone fixo no duto *versus* Vazamento de Ar UDEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



A Figura 69 apresenta o sinal gerado quando o escoamento que se encontrava em regime estacionário sendo então perturbado através da abertura da válvula de admissão de ar comprimido. Fica evidente que isso provoca uma variação das frequências captadas próximas a 6 kHz.

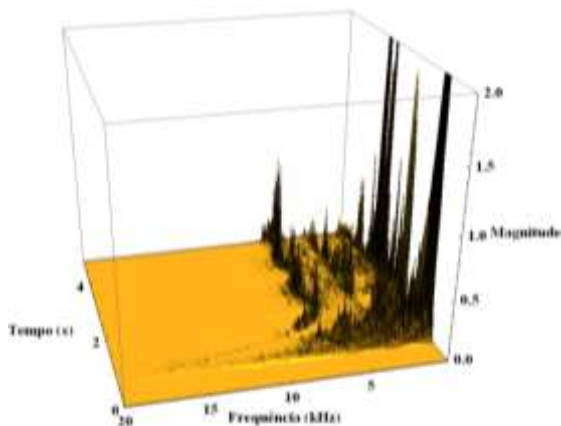
Figura 69 – Diagramas tempo-frequência do Escoamento de ar com microfone a 50 cm do duto.

- a) Espectro tempo-frequência do escoamento de ar com microfone a 50 cm do duto



- b) Espectro tempo-frequência em 3D do escoamento de ar com

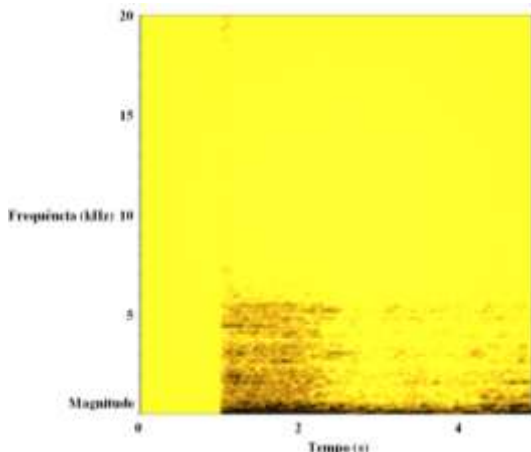
microfone a 50 cm



Na Figura 70 é mostrado o espectro de frequência em três dimensões para o fechamento da válvula de admissão de ar comprimido na rede da UEEM. Foram realizados dois testes, o primeiro com o microfone fora do duto, distante a 50 cm, e o outro com o microfone fixo no duto.

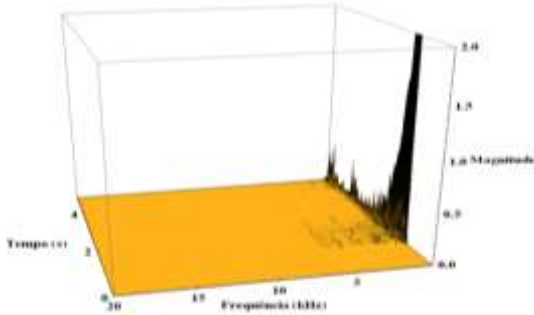
Figura 70 – Espectro tempo-frequência do fechamento da válvula de entrada do ar com microfone distante a 50 cm do duto e com ele fixo.

- a) Espectro tempo-frequência do fechamento da válvula de entrada do ar com microfone a 50 cm

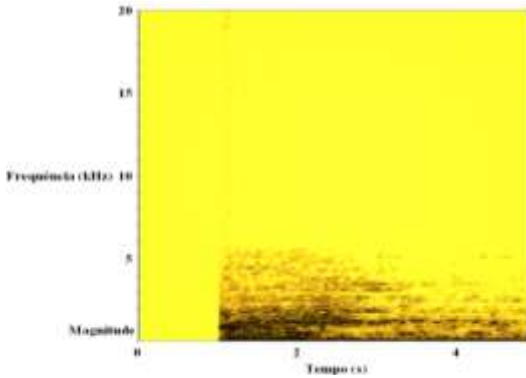


- b) Espectro tempo-frequência em 3D do fechamento da válvula

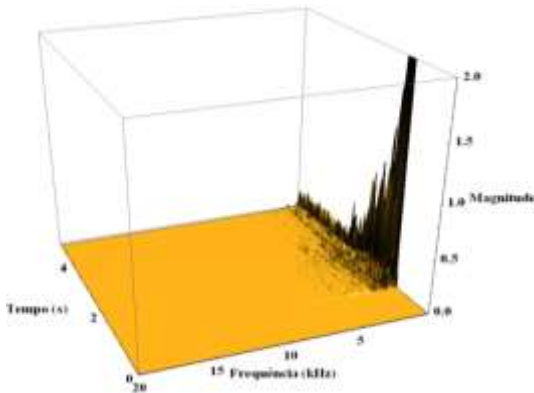
de entrada do ar com microfone a 50 cm



- c) Espectro tempo-frequência do fechamento da válvula de entrada do ar com microfone fixo no duto



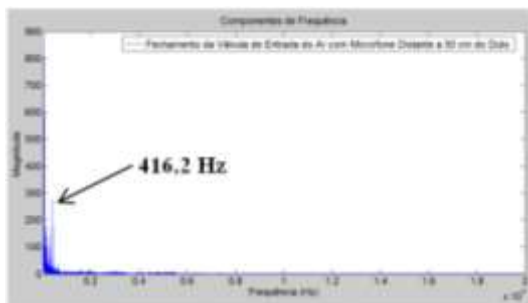
- d) Espectro tempo-frequência em 3D do fechamento da válvula de entrada do ar com microfone fixo no duto



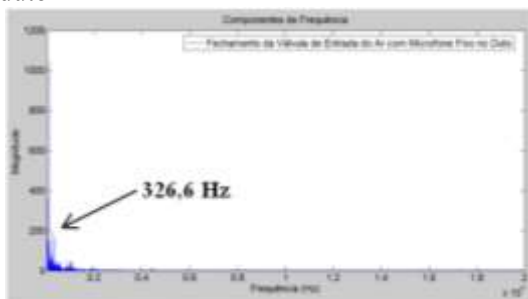
Analisando-se em conjunto as Figuras 70 e 71 é possível notar a presença de uma frequência característica para os dois casos. Nesse caso, a diferença na magnitude dos sinais não foi tão significativa como nos demais.

Figura 71 – Espectro de frequência do Fechamento da válvula de entrada do ar com microfone distante a 50 cm do duto e com ele fixo.

- a) Fechamento da válvula de entrada do ar com microfone a 50 cm



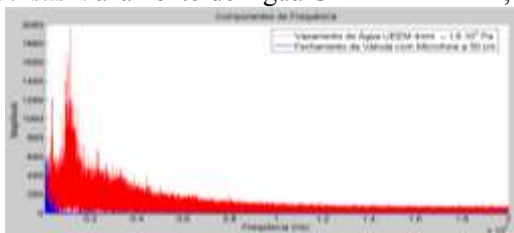
- b) Fechamento da válvula de entrada do ar com microfone fixo no duto



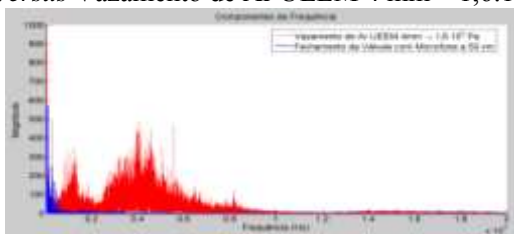
Na Figura 72 são apresentadas as comparações entre os espectros dos casos de vazamentos e do fechamento da válvula de admissão de ar comprimido na rede da UEEM. Conforme já relatado anteriormente, em nenhum dos casos há a proximidade das frequências características dos vazamentos com as encontradas para esse caso de não vazamento. Isso mais uma vez permite a distinção entre os casos de vazamento e os de não vazamento

Figura 72 – Fechamento da válvula de entrada de ar *versus* Casos de vazamento.

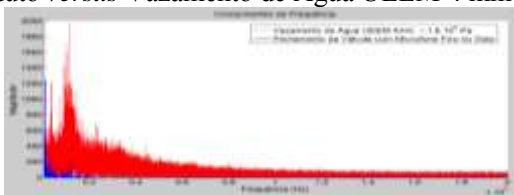
- a) Fechamento da válvula de entrada do ar com microfone a 50 cm *versus* Vazamento de Água UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



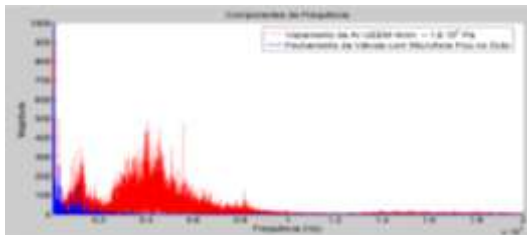
- b) Fechamento da válvula de entrada do ar com microfone a 50 cm *versus* Vazamento de Ar UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



- c) Fechamento da válvula de entrada do ar com microfone fixo no duto *versus* Vazamento de Água UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



- d) Fechamento da válvula de entrada do ar com microfone fixo no duto *versus* Vazamento de Ar UEEM 4 mm – $1,6 \cdot 10^5$ Pa



CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho teve como objetivo a caracterização acústica de vazamentos para aplicações na indústria de petróleo e gás. Na primeira etapa, foram analisados casos de vazamento de água e de gás em uma seção de duto localizado no Laboratório de Controle de Processos. A segunda etapa consistiu na realização também de vazamentos de água e de gás na Unidade Experimental de Escoamento Multifásico. Já na última etapa foram realizados casos de não vazamento para que se pudessem comparar os sinais obtidos nos casos de vazamento em relação aos de não vazamento.

Para os casos de vazamentos do LCP foram identificadas regiões de interesse para as quais foram ajustadas Gaussianas de primeira e terceira ordem. Dessas Gaussianas foi possível extrair informações bastante relevantes do sinal como a frequência e magnitude médias e o desvio padrão. Para os vazamentos realizados na UEEM foram identificados picos de frequência caracterizadores. Verificou-se que tanto no LCP quanto na UEEM os sinais dos vazamentos eram estacionários. Esse fato permite que sejam realizadas análises em determinados períodos de tempo, não necessitando do monitoramento contínuo do sistema. Isso é muito relevante para a detecção de vazamentos uma vez que exige menos da capacidade de processamento de dados do sistema.

Em todos os casos de vazamentos estudados a tendência observada foi que o aumento do diâmetro do orifício de vazamento deslocava as frequências médias para valores maiores acompanhado do aumento das magnitudes do sinal. Esse mesmo comportamento foi observado quando houve o aumento na pressão interna do duto. Nos casos em que a fenda foi utilizada os resultados obtidos foram bastante semelhantes aos dos orifícios circulares.

As frequências características dos vazamentos obtidas foram confrontadas com as de casos de não vazamento. Em todos os casos, foi possível distinguir os sinais de não vazamento daqueles de vazamento. Isso garante robustez ao método aqui estudado e proporciona a identificação segura e eficiente de vazamentos da indústria de petróleo e gás.

As diferenças encontradas em relação às características dos sinais de vazamentos apresentados no LCP e na UEEM evidenciam a necessidade de ajustes que todos os sistemas de detecção disponíveis no mercado ao serem instalados precisam passar. Dessa maneira, antes da

instalação deste sistema em uma rede de dutos real seria necessário fazer a captação dos sinais obtidos em situações rotineiras a que o duto está sujeito e também simular casos de vazamento. Após esse levantamento seria possível verificar o comportamento do sistema diante dos casos de vazamento. Pode ser que nesses casos apareçam regiões de interesse ou picos de frequências características o que permitirá o ajuste deste método de detecção para verificar a ocorrência do vazamento. Isso demonstra a possibilidade da aplicação desse estudo em sistemas dutoviários.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para dar continuidade a este trabalho sugere-se:

- Realizar experimentos com o início da aquisição dos sinais antes de começar o vazamento de modo a se ter o ruído do vazamento com a presença do escoamento;
- Utilizar mais de um sensor ao longo da UEEM para que sejam aplicadas técnicas como a de correlação cruzada para a localização do vazamento;
- Realizar estudos para verificar o efeito de atenuação do sinal para que seja levantado o número de sensores necessários ao longo do duto;
- Instalar sensores de pressão e vazão ao longo da UEEM para que os efeitos dos vazamentos nessas variáveis sejam estudados em conjunto com o espectro de frequência.

CAPÍTULO VI – BIBLIOGRAFIA

ALASKA DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION, *Technical Review of Leak Detection Technologies – Volume I – Crude Oil Transmission Pipelines*, 2006.

AZEVEDO, F. M. de., *Proposta de Algoritmo para Detecção de Vazamentos em Oleodutos Utilizando Análise Freqüencial de Sinais de Pressão*. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, 2009.

BARAÑANO, A. G., *Análise de Comportamento de Transientes de Pressão em Polidutos com Vazamento: Um Estudo Utilizando dados de Simulação*. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2001.

BARAÑANO, A. G., *Utilização de Observador de Estado em Substituição a Medidor de Vazão*. Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2006.

BRANDOLT, H. G., *Simulação de Escoamento em Dutos por Caracterização de Eventos*. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2002.

BEZERRA, B. A. F., *Detecção de Vazamentos em Tubulações de Gás pelo Método de Transitório de Pressão Utilizando CLP e Sensores*. Monografia apresentada ao Programa em Engenharia de Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE, 2008.

BIMPAS, M., AMDITIS, A., UZUNOGLU, N., *Detection of Water Leaks in Supply Pipes Using Continuous Wave Sensor Operating at 2.45 GHz*, Journal of Applied Geophysics, v.70.

Boletim da Produção de fevereiro de 2012, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=36407>>. Acesso em 20/03/2012.

CIST, D. B., SCHUTZ, A.E. *State of the Art for Pipe & Leak Detection*, Geophysical Survey Systems, Inc., N. Salem, USA, 2001.

COLOMBAROLI, P. L., *Sistema de Detecção de Vazamento em Dutos de Petróleo*. 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás – PDPETRO. Fortaleza, CE, 2009.

FERNANDES, T. G., *Do Analógico ao Digital: Amostragem, Quantização e Codificação*. II Simpósio de Iniciação Científica da Universidade Federal do ABC. Santo André, SP, 2009.

GARCIA, F. M., *Caracterização Vibroacústica de Vazamentos a partir de uma Seção de Duto para Aplicação na Indústria de Petróleo e Gás*. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2010.

GOODREAU, M.; BACHMAN, S., *Less is More: Accuracy versus Precision in Modeling*. PSIG – Pipeline Simulation Interest Group, 2000.

HAYKIN, S., BARRY, V. V., *Sinais e Sistemas*. Bookman. Porto Alegre, RS, 2004.

HSIUNC, J. T., HIMMELBLAU, D. M., *Detection of Leaks in a Liquid-Liquid Heat Exchanger Using Passive Acoustic Noise*. Computers Chemical Engineering Vol. 20, No. 9, pp. 1101-1111, 1996.

KOTANI, M., KATSURA, OSAWA S., *Detection of gas leakage sound using modular neural networks for unknown environments*. Neurocomputing 62 (2004) 427-440.

LIOU, J. C.P., *A numerical Model for Transients in Petroleum Products Pipelines*. Applied Mechanics Bioengineering and Fluids Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers. Houston, EUA, 1983.

MACIAS, I. B., *Detecção de Vazamentos em Tubulações Transportando Gás*. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de

Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 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.

MARTINS, R. S., *Sistema Inteligente para Detecção de Vazamentos em Dutos de Petróleo Usando Transformada Wavelet e Redes Neurais*. Dissertação de Mestrado, submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, 2006.

Monitor Mercantil <<http://www.monitormercantil.com.br>> Acesso em 14/12/2011.

MURTA, A. L. S., *Subsídios para o Desenvolvimento de Estudos de Impactos Ambientais para Projetos de Transporte Dutoviário*. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

PAPADAKIS, G. A., PORTER, S., WETTIG, J., *EU Initiative on the Control of Major Accident Hazards Arising from Pipelines*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 12, pp 85-90, 1999.

PEREIRA, S. B., *Investimentos em automação no Projeto PEGASO da PETROBRAS chegam a US\$ 225 milhões*. Revista InTech nº 32, 2001.

PUPIN, J. R., *Introdução às Séries e Transformadas de Fourier e Aplicações no Processamento de Sinais e Imagens*. Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Matemática da Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 2011.

DA ROCHA, A. F., CARVALHO, J.L.A., BERGER, P.A., NASCIMENTO, F.A.O., *Processamento de Sinais Biológicos*. Informática em Saúde, pp. 381-416, Editora Universa e Editora Eduel. ISBN 978-85-60485-03-1, 2008.

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, 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), 2006.

SINGH, R. K., A. R. R., *Steam leak detection in advance reactors via acoustics method*. Nuclear Engineering and Design, 2011.

SCUSSIATO, E., *Desenvolvimento de um medidor de fração de água para escoamento bifásico (água e óleo) utilizando técnicas de micro-ondas em cavidade ressonante*. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2010.

STARR, R. R., *Contribuições para a Detecção de Vazamentos em Tubulações de Gás Natural: Uma Abordagem Baseada em Conhecimento*. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2006.

SOUSA, E. O. de., *Detecção de Vazamento em Tubulações Através de Método Acústico e da Análise de Transientes de Pressão*. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2007.

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, SC, 1996.

TAKAHASHI, R. H. C., *Transformada Discreta de Fourier: Motivação e Aplicações*. I Biental de Matemática – SBM. Belo Horizonte, MG, 2002.

VAZ JUNIOR, C. A., *Detecção e Diagnóstico de Falhas com Base em Dados Históricos de Processo: Aplicação em Dutovias*. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

ZHANG, J., *Designing a Cost Effective and Reliable Pipeline Leak Detection System*. Pipeline Reliability Conference, Houston, EUA, 1996.

ZHOU, L., ZENG, Y., *Automatic Alignment of Infrared Video Frames for Equipment Leak Detection*. *Analytica Chimica Acta*, v. 584, p. 223-227, 2006.