



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Sillas de Oliveira Cézar

**USO DE PYTHON E CONCEITOS DE
INTERNET DAS COISAS APLICADOS À
TÉCNICAS VIBRO-ACÚSTICAS CLÁSSICAS
PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS**

Bauru

2021

Sillas de Olivera César

**USO DE PYTHON E CONCEITOS DE
INTERNET DAS COISAS APLICADOS À
TÉCNICAS VIBRO-ACÚSTICAS CLÁSSICAS
PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Área de Projetos Mecânicos, como parte dos requisitos necessários à obtenção de Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício César Lobato de Almeida

Bauru

2021

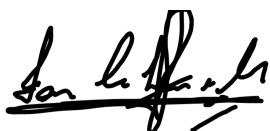
C425u	Cézar, Sillas de Oliveira Uso de Python e conceitos de internet das coisas aplicados à técnicas vibro-acústicas clássicas para detecção de vazamentos / Sillas de Oliveira Cézar. -- Bauru, 2021 103 p. : tabs., fotos Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru Orientador: Fabrício César Lobato Almeida 1. Haste de escuta. 2. Detecção. 3. Vazamento. 4. IoT. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA EM SESSÃO FECHADA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE SILLAS DE OLIVEIRA CÉZAR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 23 dias do mês de abril do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de SILLAS DE OLIVEIRA CÉZAR, intitulada **USO DE PYTHON E CONCEITOS DE INTERNET DAS COISAS APLICADOS À TÉCNICAS VIBRO-ACÚSTICAS CLÁSSICAS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã - UNESP, Prof. Dr. MARCOS SILVEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. FLÁVIO JOSÉ DE OLIVEIRA MORAIS (Participação Virtual) do(a) Coordenadoria do Curso de Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA

Agradecimentos

A toda a minha família e amigos, por me incentivarem em minhas conquistas. Em especial aos meus pais Silvina Rocha de Oliveira Cezar e Afonso Bastos Cezar, por todo apoio, inclusive financeiro, durante o período sem bolsa.

A todos os professores da Pós graduação que me ajudaram nesse percurso de crescimento pessoal e intelectual, em especial ao meu orientador Fabricio Cesar Lobato de Almeida, pelas horas de orientação e paciência, durante esse percurso.

A SABESP pela disponibilização do campo de prova de Tupã-SP para os testes realizados e discussões ao longo do projeto.

A capes (Número de processo 1836088) pelo apoio financeiro.

USO DE PYTHON E CONCEITOS DE INTERNET DAS COISAS APLICADOS À TÉCNICAS VIBRO-ACÚSTICAS CLÁSSICAS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS

Sillas de Oliveira César

Palavras-chave: haste de escuta, detecção, vazamento, IOT

Resumo - A escassez de água e a distância entre grandes centros urbanos em relação as áreas com disponibilidade de recursos hídricos são obstáculos que elevam o custo de empresas de distribuição de água e saneamento, bem como impõem a necessidade de redução de perdas no sistema de distribuição. Equipamentos analógicos e/ou digitais são usados para auxiliar na detecção e localização de vazamentos visando reduzir o desperdício de água. Tendo em vista o grande problema econômico e social gerado pelos vazamentos, bem como, as constantes melhorias em técnicas clássicas de detecção de vazamentos, faz-se necessário alternativas práticas e viáveis economicamente para enfrentar esse desafio. O correlacionador de ruídos é uma ferramenta vibro-acústica que apresenta maior precisão na localização de vazamentos, apesar de possuir um alto custo envolvido e um processamento de sinais mais complexo. Essa técnica utiliza sensores vibro-acústicos juntamente com a técnica da correlação cruzada para estimar a posição do vazamento ao longo da tubulação. Por outro lado, a chamada haste de escuta, geralmente analógica, é a técnica vibro-acústica mais simples e utilizada para pesquisa de detecção de vazamentos devido principalmente a seu baixo custo, robustez e manuseio. Porém, essas técnicas possuem algumas limitações quando utilizadas em tubos de plástico devido a elevada atenuação do ruído de vazamento que dificulta o seu uso na detecção dos mesmos. A correlação cruzada só é eficiente quando a banda de frequência onde a energia de vazamento está localizada é selecionada corretamente. Entretanto, esse procedimento é feito manualmente pelo usuário que geralmente não possui nenhum treinamento em processamento de sinais. A haste de escuta, por sua

vez, necessita de pessoal com audição treinada capaz de identificar a presença de um possível vazamento apenas auscultando o sinal obtido, dificultando sua localização em posições distantes do vazamento quando o tubo é de plástico. Portanto, esse trabalho tem como objetivo desenvolver soluções práticas para o uso dos correlacionadores de ruído de vazamento e haste de escuta, visando uma melhor gestão de perdas de água em sistemas de distribuição. Desenvolveu-se para o correlacionador de ruído um *software* em formato *web*, utilizando a linguagem de programação livre Python, que estima a banda de frequência onde a energia de vazamento pode ser encontrada, bem como a estimativa do atraso de sinais. Para a haste de escuta, foi feita sua caracterização, visando estudar o comportamento do ruído de vazamento que se propaga em sua estrutura, bem como, a implementação de melhorias através do processamento clássico de sinais e tecnologias aplicadas em IoT (*Internet of Things*). Os testes práticos foram realizados em um campo de prova que simula situações reais de vazamento fornecido pela SABESP na cidade de Tupã.

USE OF PYTHON AND CONCEPTS OF INTERNET OF THINGS APPLIED TO CLASSICAL VIBRO-ACOUSTIC TECHNIQUES FOR LEAK DETECTION

Sillas de Oliveira Cézar

Keywords: listening stick, leak, detection, IoT

Abstract - Water shortage together with long distances between large cities and areas where water resources can be found are factors that increase the cost of water distribution, mainly responsible for the pressure on water industry companies to reduce losses in their distribution systems. Analog and/or digital devices are used to assist in the detection and location of leaks in order to reduce water loss. Moreover, the presence of leaks in water distribution systems can cause economic and social problems, so that constant improvements in classic leak detection techniques are necessary but taking into account practical and economically viable alternatives to face this problem. The leak noise correlator is the most accurate vibro-acoustic technique for leak detection, but it has a high cost involved and more complex signal processing. This technique uses vibro-acoustic sensors together with the cross-correlation method to estimate the position of the leak along the pipe. On the other hand, the so-called listening stick, which is usually an analog device, is the simplest vibro-acoustic technique and used for leak detection surveys due to its low cost, robustness and handling. However, these techniques have some limitations when applied to plastic pipes due to the high attenuation of leak noise in such systems. The correlation technique is effective when the frequency range over which leak signals can be detected. The listening stick, however, requires experienced personnel capable of identifying the presence of a possible leak just by listening to the leak signal that propagates along the stick when placed onto the pipe. Therefore, the objective of this work is to develop practical solutions for the use of leak noise correlators and listening stick techniques, aiming at a better management of water loss in distribution

systems. A software in web format was developed for the leak noise correlator by using the free programming language Python, which estimates the frequency band over which leak noise can be found. Moreover, the time delay between the two sensors can also be estimated using such software. For the listening stick, however, its vibration characterization was carried out to investigate how the leak noise propagates along it when placed onto the pipe. Besides, improvements based on classic signal processing tools together with concepts applied in IoT (Internet of Things) area were implemented. Practical tests were conducted in a test rig provided by SABESP and located in the city of Tupã that simulates real leak conditions.

Sumário

Resumo	iv
Abstract	vi
Lista de Figuras	x
Nomenclatura	xv
1 Introdução	1
1.1 Introdução ao problema	1
1.2 Revisão de literatura	5
1.2.1 Perdas via Vazamentos em Sistemas de Distribuição de Água . . .	5
1.2.2 Técnicas clássicas usadas para localizar e detectar vazamentos . .	7
1.2.3 Algumas pesquisas realizadas no Brasil sobre o assunto	12
1.2.4 Uso da Internet das coisas IoT	15
1.2.5 Uso do Microprocessador Raspberry Pi	18
1.3 Estrutura da dissertação	19
2 Simulador virtual de ruído de vazamento	20
2.1 A correlação-cruzada em problemas envolvendo detecção de vazamentos .	21
2.2 Número de onda para um tubo enterrado	24
2.3 Definição da banda de frequência efetiva teórica para sinais de vazamento	25
2.4 Cálculo da correlação cruzada: processamento de sinais clássico	28
2.5 <i>Software</i> para teste virtual do uso de correlacionadores	29

2.6	Simulações	31
2.7	Conclusão	35
3	Descrição do campo de prova e medições com haste de escuta	36
3.1	Descrição do Campo de Prova de Vazamentos de Tupã (CPVT)	37
3.2	Descrição dos equipamentos utilizados e a aquisição de sinais	39
3.3	Descrição dos testes e processamento de sinais para a caracterização da haste de Escuta	40
3.4	Influência do manuseio do usuário e tipo de ponta utilizada na aquisição do sinal com a haste de escuta	45
3.5	Influência da escolha dos pontos de medida, direção da medição	48
3.6	Efeito da superfície de contato na medição via haste de escuta	53
3.7	Sensibilidade da haste instrumentada para diferentes distâncias	56
3.8	Conclusão	58
4	Conceitos de Internet das Coisas Aplicados a Haste de Escuta	59
4.1	Caracterização do sistema de medição via Raspberry pi	60
4.2	Software desenvolvido	66
4.3	Conclusão	69
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	70
5.1	Conclusões	70
5.2	Trabalhos Futuros	73
5.3	Publicações	74
	Referências Bibliográficas	75
A	Detalhes da construção do software on-line	80
A.1	Programação	80
A.2	Software com interface gráfica via HTML	82

Lista de Figuras

1.1	(a) Comparação de índices de perda de faturamento das regiões do Brasil; (b) Comparação de Índices de perda de faturamento de água entre países (Adaptado de Oliveira et al. (2018).	6
1.2	As principais técnicas acústicas utilizadas. Na primeira coluna encontra-se a identificação da técnica, na segunda suas respectivas imagens (analógica e digital) e na terceira coluna apresenta o esquema de medição de cada um desses equipamentos.	10
2.1	Esquema de aquisição dos sinais em problemas de detecção e localização de vazamentos em tubulações de plástico de sistemas de distribuição de água subterrâneos, pela utilização de técnicas acústica/vibratória.	22
2.2	Esquema de um tubo enterrado transportando água.	24
2.3	Banda de frequência estimada. (a) Utilizando um hidrofone como sensor. (b) Utilizando um geofone como sensor. (c) Utilizando um acelerômetro como sensor. (A linha azul corresponde ao sinal processado, a área sombreada indica a banda de frequência efetiva do sistema, e a linha preta pontilhada indica onde $ \bar{S}_{x_1x_2} = 0.1$).	27

2.4	Comparação entre o sinal de uma medição real com o de um simulado. (a) Esquema do teste realizado. (b) Densidade espectral cruzada (DEC), calculada a partir dos sinais medidos nas posições 1 e 2. (c) Fase do sinal da DEC. (d) Correlação cruzada calculada a partir dos sinais medidos nas posições 1 e 2 (atraso do sinal). (i) Teste realizado no campo de prova de São Paulo. (ii) Teste realizado no campo de prova de Tupã. (iii) Teste realizado no campo de prova da Inglaterra. (A linha em vermelho corresponde ao sinal real, medido, a linha em azul representa o sinal simulado, enquanto a linha preta pontilhada indica onde $ \bar{S}_{x_1x_2} = 0.1$). .	34
3.1	Representação esquemática do campo de prova de vazamentos de Tupã (CPVT).	37
3.2	(a) Tubulação desenterrada onde o experimento é realizado. (b) Posição do vazamento.	39
3.3	a(i) Esquema da disposição dos sensores e referência global. b(i) Va- zamento. a(ii) Haste metálica presa por elásticos. b(ii) Haste metálica segura pelo operador. a(iii) Ponta de contato fina. b(iii) Ponta de contato chata.	42
3.4	Campanha de testes com novo mecanismo de vazamentos (a) Mecanismo de vazamento com válvula. a(i) Mecanismo completo sem vazamento. a(ii) Mecanismo completo com o vazamento. (b) Posições do teste. b(i) Esquema das posições em que foram realizadas as medições com a haste no tubo. b(ii) Aquisição no ponto.	43
3.5	Comparação entre os procedimentos de aquisição. (a) PSD do sinal ad- quirido no tubo (P_v). (b) PSD do sinal adquirido do sensor da haste (fone). (A linha vermelha corresponde a haste presa por elásticos; linha preta a segura pelo operador).	46

3.6	Comparação entre os tipos de ponta utilizados. (a) PSD do sinal adquirido no tubo. (b) PSD do sinal obtido com a ponta chata e fina no ponto $P_e(z)$. (A linha vermelha corresponde a ponta fina; linha preta a ponta chata).	48
3.7	PSD do sinal obtido dos sensores nos pontos P_v , P_b , P_t e P_e , nas direções (x,y,z). (a) No ponto P_v . (b) No ponto P_b . (c) No ponto P_t . (d) No ponto P_e . (A linha preta corresponde ao eixo x; linha vermelha ao eixo y; linha verde tracejada ao eixo z).	50
3.8	Coerência do sinal obtido do sensor P_v em relação aos sensores P_b , P_t e P_e , nas direções (x,y,z). (a) Sinal de entrada $P_v(x)$. (b) Sinal de entrada $P_v(y)$. (c) Sinal de entrada $P_v(z)$. (i) Sinal de saída $P_b(x,y,z)$. (ii) Sinal de saída $P_t(x,y,z)$. (iii) Sinal de saída $P_e(x,y,z)$. (A linha preta corresponde ao eixo x do ponto em análise; linha vermelha ao eixo y; linha verde tracejada ao eixo z).	51
3.9	Coerência do sinal obtido da haste com o próprio sensor e com o sensor externo. (a) Coerência entre os sinais obtidos do ponto P_v em relação aos pontos $P_e(z)$ e o fone (haste instrumentada completa). (b) PSD dos sinais obtidos do ponto $P_v(z)$ e Fone. (A linha em cor preta representa o sinal do ponto $P_e(z)$ enquanto a linha em cor vermelha o sinal do fone).	52
3.10	PSD do sinal adquirido para os casos 1 e 2. (a) Análise do ponto P_v . (b) Análise do ponto P_e . (As linhas em cor preta correspondem aos resultados das medições com a haste na tubulação (caso 1) e em azul as medições adquiridas com a haste no colar (caso 2)).	54
3.11	(a) Resultado da função de resposta em frequência para os casos 1 e 2. (b) Resultado da Coerência entre os pontos para os casos 1 e 2. (i) Resposta em frequência H_{tubo} . (ii) Resposta em frequência H_{hn} . (As linhas em cor preta correspondem aos resultados das medições com a haste na tubulação e em azul as medições adquiridas com a haste no colar).	55

3.12	Verificação da sensibilidade da haste instrumentada. (a) Aquisição realizada ao lado do vazamento. (b) Aquisição realizada a 1m do vazamento. (c) Aquisição realizada a 2m do vazamento. (d) Aquisição realizada a 3m do vazamento. (e) Aquisição realizada a 6m do vazamento. (f) Aquisição realizada a 13m do vazamento. Onde a linha preenchida corresponde ao sinal do vazamento e a linha pontilhada ao sinal do ruído de instrumentação do equipamento.	57
4.1	(a) Representação esquemática dos pontos de medições. (b) Representação esquemática no sistema de aquisição com o <i>Raspberry</i> . (c) <i>Raspberry Pi</i> com a placa de áudio USB e GPS conectados. (d) Imagem do programa espelhada no celular.	62
4.2	Valores de RMS_n dos sinais medidos. (As linhas cheias correspondem ao sinal medido durante o vazamento, enquanto a linha pontilhada representa o sinal do ruído de instrumentação. As linhas em preto indicam o sinal medido com o sistema de aquisição Siemens, enquanto as linhas em vermelho, as aquisições realizadas com o <i>Raspberry</i>).	64
4.3	PSD do sinal obtido com o <i>Raspberry Pi</i> e o sistema de aquisição Siemens. (a) Medições utilizando o sistema de aquisição Siemens. (b) Medições realizadas com o <i>Raspberry</i> . (i) Medições realizadas ao lado do vazamento. (ii) Medições realizadas a 1m do vazamento. (iii) Medições realizadas a 2m do vazamento. (iv) Medições realizadas a 3m do vazamento. (Onde as linhas em preto correspondem as aquisições realizadas com o sistema Siemens e as linhas em vermelho correspondem as aquisições com o <i>Raspberry</i>).	65
4.4	<i>Software</i> desenvolvido. (a) Esboço da interface do usuário com o <i>software</i> . (b) Interface do <i>software</i> espelhada no <i>smartphone</i>	67
4.5	Interface gráfica do Raspberry Pi espelhada no <i>smartphone</i>	69

A.1	Fluxo de uma requisição no Django.	81
A.2	Dados de entrada dos programas.	82
A.3	Dados de entrada dos programas.	83
A.4	Resultado da simulação do cálculo estimado da banda de frequência para correlacionadores.	84
A.5	Resultado da simulação do cálculo estimado estimado da correlação cruzada e fase para correlacionadores.	84

Nomenclatura

Designação	Explicação
Símbolos Latim	
a	Raio médio do tubo
B_{agua}	Módulo de Bulk da água
B_{solo}	Módulo de Bulk do solo
B_{solo}^*	Módulo de Bulk complexo do solo
c	Velocidade de propagação de onda do ruído
c_s	Velocidade do som na água
d	Distância entre os sensores
d_1	Distância entre o sensor 1 e o vazamento
d_2	Distância entre o sensor 2 e o vazamento
E^*	Módulo de Young Complexo
E	Módulo de Elasticidade
$F^{-1}\{\}$	Transformada inversa de Fourier
f	Frequência (Hz)
F_s	Frequência de amostragem
G	Módulo de cisalhamento real
G^*	Módulo de cisalhamento complexo
g	Filtro de onda quadrada
h	Espessura da parede do tubo
H	Resposta em frequência

H_1^*	Complexo conjugado da resposta em frequência do sinal 1
H_2	Resposta em frequência do sinal
Im	Parte imaginária
j	Número imaginário
K_1	Componente 1 de rigidez dinâmica
K_2	Componente 2 de rigidez dinâmica
K_3	Componente 3 de rigidez dinâmica
k	Número onda
k_{agua}	Número de onda da água
k_d	Número de onda dilatacional no solo
k_r	Número de onda de cisalhante no solo
k_d^r	Número de onda radial dilatacional
k_r^r	Número de onda radial cisalhante
K_{agua}	Rigidez dinâmica da água
K_{solo}	Rigidez dinâmica do solo
K_{tubo}	Rigidez dinâmica do tubo
$max(\bullet)$	Valor máximo da função
n	Valores inteiros
P_{01}	Distância entre o vazamento e o ponto de medida 1
P_{02}	Distância entre o vazamento e o ponto de medida 2
P_1	Ponto situado a 1m do vazamento
P_2	Ponto situado a 2m do vazamento
P_3	Ponto situado a 3m do vazamento
P_b	Sensor na base da haste
P_e	Sensor na extremidade da haste
P_t	Sensor no topo da haste
P_v	Sensor na tubulação, ao lado do vazamento

P_h	Sensor da própria haste instrumentada
RMS	Raiz do valor quadrático médio (RMS - <i>Root mean square</i>)
$R_{x_1x_2}$	Correlação cruzada
R_f^*	Resposta em frequência do complexo conjugado
R_{f_1}	Resposta em frequência para x_1
R_{f_2}	Resposta em frequência para x_2
R_e	Parte real
s	Onda estrutural
S_0	Constante
S_{ll}	Auto densidade espectral do ruído de vazamento
$S_{x_1x_1}$	Auto Densidade Espectral (PSD – <i>Power Spectral Density</i>) do sinal em x_1
$S_{x_2x_2}$	Auto Densidade Espectral (PSD – <i>Power Spectral Density</i>) do sinal em x_2
$S_{x_1x_2}$	Espectro cruzado de potência (CPSD – <i>Cross Power Spectral Density</i>) do sinal x_1 e x_2
$\bar{S}$	CPSD normalizada
T_0	Atraso do sinal
T	Período de amostragem do sinal
x	Distância do vazamento ao ponto de medição
$x_1(t)$	Sinal medido na posição 1
$x_2(t)$	Sinal medido na posição 2
x_f	Função que descreve o sinal filtrado
X_n	Sinal de saída da haste
H_{tubo}	Função de resposta em frequência do tubo
H_{hn}	Função de resposta em frequência

H_{h1}	FRF da haste quando colocada diretamente no tubo (tubo-haste)
H_{h2}	FRF da haste quando colocada no colar metálico (tubo-colar metálico-haste)
Y	Função de Hankel de segunda espécie
Y_0	Função de Hankel de segunda espécie de ordem 0
Y_1	Função de Hankel de segunda espécie de ordem 1
Símbolos gregos	
γ^2	Coerência
δ	Função delta de Dirac
η_{tubo}	Fator de perda no tubo
η_d	Fator de perda dilatacional do solo
η_c	Fator de perda devido cisalhamento do solo
ρ_{tubo}	Densidade do material do tubo
ρ_{solo}	Densidade do material do solo
τ	Atraso do sinal
ψ	Inversa do módulo da CPSD
ω	Frequência (rad/s)

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo apresenta uma introdução geral sobre a problemática dos vazamentos, contextualizando a importância de medidas para sua detecção, bem como, as principais ferramentas utilizadas para sua detecção e localização. É apresentada uma revisão bibliográfica, com uma visão geral sobre as técnicas utilizadas na detecção dos vazamentos, e a possível conectividade dessas técnicas a dispositivos por meio da *Internet of Things* (IoT). A justificativa e os objetivos deste trabalho também são apresentados neste capítulo.

1.1 Introdução ao problema

A escassez de água potável em grandes centros aumenta a pressão sobre as companhias de saneamento de água para reduzir o desperdício. Esta política está fortemente ligada à detecção de vazamentos e reparo dos tubos (COLOMBO; KARNEY, 2002). Segundo as Nações Unidas (UN) (UN, 2020) e a Agência Ambiental Europeia (EEA) (EEA, 2019), estima-se que mais de 40% da população global seja afetada pela escassez de água até 2030. Já no Brasil, de acordo com uma pesquisa realizada em 2018 pelo Instituto Trata Brasil, que é uma organização da sociedade civil de interesse público, visando avanços do saneamento básico e na proteção dos recursos hídricos do país, em média 39% da água produzida pelas companhias de distribuição de água é desperdiçada, seja devido a vazamentos em tubulações, conexões ilegais e erros de medição (VALESCO,

2017b). Essa marca pode ser facilmente ultrapassada em algumas cidades, como no caso de Manaus, em que 73,1% da água tratada não é cobrada (VALESCO, 2017a). Esses dados são inaceitáveis em qualquer cenário e colocam as empresas de saneamento básico sob pressão para reduzir as perdas de água nos sistemas de distribuição.

As perdas nos sistemas de distribuição de água são comumente classificadas como perda aparente e real (MONTEIRO, 2006). A perda aparente ou perda não física reflete o volume de água consumido, mas não contabilizado pela companhia de água por problemas no medidor ou ligações ilegais de água. A perda real ou física refere-se ao volume de água perdido mesmo antes de chegar ao consumidor final, resultante de vazamentos nas redes de distribuição. Já os vazamentos por sua vez, podem ser classificados como visíveis, transbordam a superfície com fácil identificação, e os não-visíveis, que não podem ser identificados com uma simples observação. Mesmo sendo visíveis na superfície (poça d'água), os mesmos podem estar localizados a algumas centenas de quilômetros. Portanto o uso de técnicas que detectam e localizam vazamentos se fazem necessária.

O controle eficaz da perda de água oferece muitos benefícios. As concessionárias de água que o fazem com melhor eficiência sustentam melhor os recursos hídricos e planejam a infraestrutura de abastecimento de água futuro (AWWA, 2018). A receita recuperada dessas atividades de controle de perdas podem ser realocadas para financiar abastecimento, infraestrutura ou atividades adicionais de controle de perda de água.

As medições de pressão e o fluxo de água no sistema de distribuição são geralmente utilizados como ferramentas/técnicas iniciais para detectar a área e a rede da tubulação que potencialmente tem a presença de vazamentos. Técnicas vibro-acústicas podem ser usadas posteriormente para localizar o vazamento, refinando assim a busca. Estas técnicas vem sendo aplicadas constantemente a problemas de localização de vazamentos por mais de 30 anos (FUCHS; RIEHLE, 1991). Entre as técnicas acústicas mais difundidas estão: o uso de hastes de escuta, geofones e a aplicação de correlação cruzada via dispositivo chamado de correlacionadores de ruído de vazamento.

As hastes de escuta são barras de metal com uma câmara acústica no final, geral-

mente fabricadas em madeira para reduzir custos (PADILHA P. S. E NIIDA, 2003) e amplificar o sinal que propaga-se ao longo da haste mecanicamente. Entretanto, existem as hastes de escutas chamadas de digitais, onde é utilizado um sensor juntamente com um amplificador digital de sinais (volume) e fone de ouvido para facilitar a escutar o sinal de vazamento, principalmente quando os fones possuem metodologia de cancelamento de ruído externo. Estas hastes são utilizadas em contato com o tubo em pontos de acesso específicos, uma vez que estes (tubos) são guias de ondas que transmitem a energia vibratória por toda a estrutura e, portanto, podem ser ouvidas pelo operador (COSTA, 2011).

Assim como a haste de escuta, o geofone também pode ser do tipo mecânico ou digital. O geofone mecânico consiste de câmaras tipo placa colocadas na superfície acima do tubo enterrado onde pretende-se localizar os vazamentos (COSTA, 2011). A energia do vazamento propaga-se na superfície acima do tubo enterrado e é detectada e amplificada pela câmara acústica do geofone transmitida ao ouvido do usuário através de fones analógicos, como o estetoscópio usado na medicina. No entanto, tais dispositivos podem ser instrumentados para melhorar sua eficácia, bem como melhorar o nível de sinal-ruído através da amplificação eletrônica, juntamente com o processamento simples (ZANIBONI, 2009). Estes são os chamados geofones digitais e geralmente utilizam somente um sensor acoplado a uma placa que por fim, é colocada na superfície acima do local do possível vazamento para escutar.

A técnica mais sofisticada entre os três é a *Cross Correlation* (Correlação cruzada). Ele pode ser calculado tomando a transformada inversa de Fourier da função *Cross Spectral Density* (CSD) de um sinal de vazamento (SHIN; HAMMOND, 2008). Estes equipamentos, no entanto, são muito caros, principalmente no Brasil por serem importados e sofrerem com a variação cambial. Portanto, é desejável uma maneira mais barata e alternativa de usar técnicas aprimoradas baseadas em técnicas clássicas de processamento de sinais para detectar vazamentos.

Justificativa

Tendo em vista o grande problema econômico e social gerado pelos vazamentos em tubulações enterradas, bem como a complexidade dos instrumentos e técnicas utilizadas para a localização do mesmo, faz-se necessário alternativas práticas para o combate a este problema. Os correlacionadores de ruído são dispositivos utilizados para detecção e localização de vazamentos através da técnica de correlação cruzada, mas para um bom desempenho depende da seleção correta da banda de frequência onde se encontra a energia espectral do vazamento. A grande limitação desse equipamento é que essa banda quase sempre é desconhecida, o que pode acabar prejudicando na decisão do operador a escolher/utilizar essa ferramenta. Já o dispositivo mais utilizado para detecção e localização de vazamentos, a haste de escuta, também apresenta algumas peculiaridades. Esse instrumento necessita de uma grande experiência do operador em auscultar o sinal proveniente de uma investigação, a ponto de identificar através deste a presença ou não de um vazamento, sem nenhum tipo de auxílio de uma ferramenta de processamentos de sinais que poderia auxiliar na visualização dos dados, principalmente aqueles dúbios que podem indicar um falso positivo para a presença e localização do vazamento.

Objetivos

Do exposto acima, pode-se então citar os seguintes objetivos deste trabalho:

- Utilizar um modelo de propagação de ondas clássico já desenvolvido e utilizá-lo como ferramenta para simular condições de vazamento distintas onde parâmetros como o tipo de tubo (material e geometria), tipo de solo e distância entre os sensores podem ser atribuídas visando o cálculo estimado da banda de frequência onde a energia de vazamento está localizado, auxiliando assim no entendimento do método de correlação cruzada, bem como, ajudando na escolha do mesmo quando a banda for “larga” o suficiente para uma boa estimativa da correlação cruzada, que é utilizada como ferramenta para a detecção e localização de vazamentos;

- Caracterizar uma haste de escuta em um ambiente controlado, ou seja, onde é possível replicar condições de vazamento simuladas próximas da real, para entender como a energia do mesmo se propaga ao longo da haste de escuta visando utilizar tal informação, juntamente com técnicas de IoT e processamento de sinais clássicos para melhorias no processo de identificação e localização de vazamentos em tubos de distribuição de água.

1.2 Revisão de literatura

Nessa seção serão abordados os principais temas relacionados a perdas devido vazamento, como classificações e tipos, técnicas acústicas mais utilizadas para sua detecção, importância e impacto do tema no âmbito econômico, social e ambiental, bem como alguns dos principais estudos relacionados ao assunto no Brasil.

1.2.1 Perdas via Vazamentos em Sistemas de Distribuição de Água

Por definição os vazamentos são provenientes de defeitos nas junções dos tubos, trincas ou perfurações, que acarretam a perda de água através de fluxos contínuos. Um vazamento em uma tubulação que opera com líquidos sob pressão, como acontece nas redes de distribuições de água, onde o som é transmitido de forma contínua e com intensidade irregular por meio do orifício responsável pelo vazamento (ZANIBONI; TSUTIYA, 2009).

A presença de vazamentos está obviamente relacionada com a perda de água, volume referente a diferença entre a água fornecida ao sistema de abastecimento e o consumo autorizado da prestadora de serviço (ALEGRE, 2016). Milhões são investidos no custo operacional de fornecimento e tratamento de um produto que não será faturado. As perdas em um sistema de distribuição de água trazem consequências tanto para as companhias de saneamento, quanto para o meio ambiente, já que um alto desperdício corresponde a uma necessidade de captação e produção maiores que o volume realmente exigido pela sociedade, bem como potencial inserção de contaminantes nos sistemas de

distribuição.

A média de perdas de faturamento total da água potável produzida, é de aproximadamente 36% no Brasil, podendo ultrapassar facilmente essa marca, como no caso da região Norte, em que 56% da água não é cobrada (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Na Figura 1.2.1(a) pode-se observar diferença entre os níveis de eficiência da distribuição de água nas diversas regiões brasileiras, enquanto na Figura 1.2.1(b) pode-se observar o índice de perda de faturamento total de água entre alguns países.

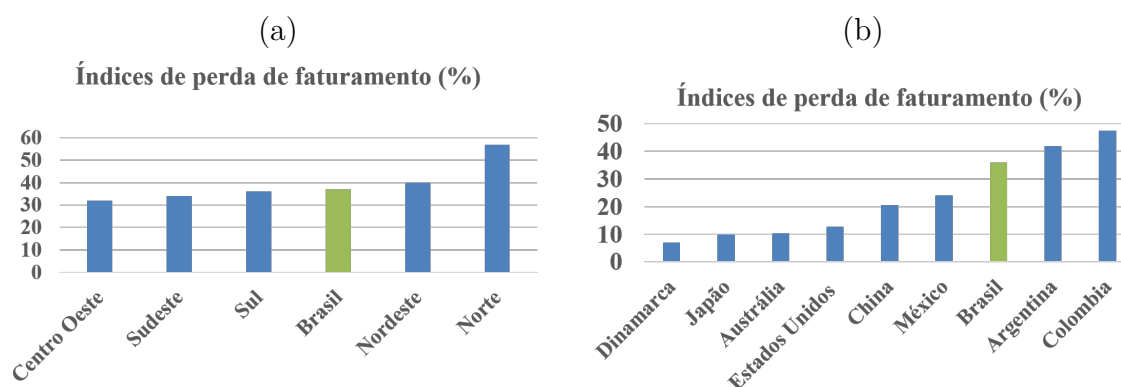


Figura 1.1: (a) Comparação de índices de perda de faturamento das regiões do Brasil; (b) Comparação de Índices de perda de faturamento de água entre países (Adaptado de Oliveira et al. (2018)).

O prejuízo financeiro relacionado as perdas no faturamento total de água produzida no ano de 2016 passaram a casa dos R\$ 10 bilhões, valor que corresponde a 92% de todo o valor investido pelo setor de saneamento básico no mesmo período em todo o país (VALESCO, 2017a).

No Brasil, estima-se que a SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), a maior empresa de saneamento e distribuição de água da América Latina possua uma perda de água real de cerca de 31,4% (LEITE, 2017), muito superior a marca dos 2% alcançada pela capital do Japão, Tóquio, uma das cidades que menos desperdiça água no mundo, ou os 6,9% da Dinamarca. Logo, a cada 1 mil litros de água tratada pela SABESP, 314 litros se perdem por defeitos na tubulação ou são furtados antes de chegar aos consumidores (LEITE, 2017).

1.2.2 Técnicas clássicas usadas para localizar e detectar vazamentos

O som é um fenômeno acústico que consiste na propagação de ondas sonoras produzidas por um corpo que vibra em um meio material elástico, logo o som nada mais é do que a oscilação da pressão em um meio elástico, que pode ser percebida pelo ouvido humano. A quantidade de oscilações da pressão nesse meio por unidade de tempo, define a sua frequência. A frequência normalmente é expressa em Hertz e a pressão em Pascal. Em uma tubulação de saneamento o ruído de vazamento é caracterizado pela interação fluido estrutura, especialmente quando o regime for do tipo turbulento (PAPASTEFA-NOU; JOSEPH; BRENNAN, 2012). O ruído de vazamento induz a uma vibração no tubo, cujo principal mecanismo é caracterizado pelo bom acoplamento entre o fluido e a estrutura (parede do tubo) de forma que medições no fluido (pressão sonora) ou na estrutura (deslocamento, velocidade e aceleração) podem ser obtidos visando estimar a localização do vazamento (PINNINGTON; BRISCOE, 1994). Entretanto, o ruído de vazamento é corrompido por ruídos espúrios como, por exemplo: ruídos de instrumentação, máquinas próximas, trânsito de pessoas, veículos, entre outros (ZANIBONI, 2009).

As técnicas clássicas usadas para detectar vazamentos mais utilizadas atualmente são as técnicas acústicas, por serem mais práticas e eficazes. As técnicas não acústicas, por sua vez, são mais complexas e demoradas, e são mais suscetíveis a erros em situações práticas (GAO *et al.*, 2004). As principais técnicas acústicas utilizadas são:

- Geofone que pode ser do tipo analógico ou digital e geralmente é utilizado para medição do ruído do vazamento na superfície acima da qual o tubo está enterrado;
- Haste de escuta, que assim como o geofone, pode ser analógico ou digital e geralmente é utilizado para medição da vibração do ruído de vazamento em pontos do tubo ou válvulas acopladas ao mesmo;
- Correlacionador de ruídos de vazamento, que possui a peculiaridade de usar dois

sensores e a técnica da correlação cruzada.

A Figura 1.2 apresenta os equipamentos mencionadas, onde é possível observar na segunda coluna a imagem da haste de escuta (analógica e digital), geofone (analógico e digital) e o correlacionador de ruídos. Além da apresentação dos instrumentos, a Figura 1.2 informa também o esquema de medição de cada um desses equipamentos, como pode-se observar na terceira coluna.

O geofone analógico utiliza uma câmara acústica para amplificar o ruído de vazamento analogicamente facilitando a auscultação do ruído de vazamento. Já o modelo digital usa sensores, geralmente do tipo piezoelétrico com a tensão de saída é proporcional a velocidade da excitação medida. Para detecção de vazamento, entretanto, tem como objetivo detectar a vibração originárias dos mesmos devido a passagem da água pelos pontos de ruptura das tubulações (DALMO F. C, 2007). Sua faixa de operação depende da sensibilidade do sensor que fica em contato com o solo. Os mais utilizados, geralmente, possuem a faixa operacional entre 30Hz a 3kHz, como o modelo ek-3107 da Elekatron.

Algumas pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de tornar essa ferramenta mais eficiente, como a adição de um filme de fluoreto de polivinilideno ao sensor piezoelétrico, juntamente com um feixe em balanço espiral, capaz de aumentar sua sensibilidade e reduzir a frequência de corte de baixa frequência (LI *et al.*, 2020). Têm-se também estudos voltados a implementação de um sensor inteligente sem fio e uma unidade de *gateway* (sistema ou equipamento encarregado de estabelecer a comunicação entre o equipamento e a internet), tornando-o um sistema de aquisição de dados sísmicos sem fio com transmissão de dados em tempo real (ATTIA *et al.*, 2020). Sistemas ativos de controle também são empregados. Um circuito de retroalimentação de força eletromagnética foi adicionado na extremidade de saída do geofone de bobina móvel, projetado de acordo com as características dinâmicas do geofone. Os parâmetros do circuito foram otimizados com base em algoritmos genéricos, capaz de deslocar a frequência natural do

geofone de 10 Hz para 5 Hz (SONG *et al.*, 2017).

A haste de escuta analógica consiste em uma haste de metal com comprimento entre 1,0 e 1,5 m, com uma câmara acústica em sua extremidade para amplificar o sinal de vazamento que se propaga ao longo de sua estrutura analogicamente, aumento assim sua “capacidade” de identificar a ocorrência de vazamentos nas proximidades dos pontos pesquisados. (SILVA *et al.*, 2008). A haste de escuta digital também utiliza um sensor piezoelétrico e um potenciômetro, como ferramenta de ganho digital. A sua faixa de operação está entre 200 a 1500 Hz, encontrando vazamentos com mais facilidade no intervalo de 600 a 800 Hz (ZANIBONI, 2009) devido a característica espectral do sinal medido. Seu princípio de funcionamento baseia-se no contato direto de sua barra metálica com pontos de redes de abastecimento para detectar som ou vibração induzida por vazamentos (HUNAIDI *et al.*, 2000) que são propagados até sua extremidade que possui mecanismos ou materiais sensíveis, como elementos piezoelétricos (ZANIBONI, 2009). Como mencionado anteriormente, esses mecanismos podem ser mecânicos, que possuem uma membrana vibratória capaz de reproduzir acusticamente a vibração da haste, ou eletrônico onde no lugar da membrana incorporam amplificadores de sinal que através do contato da base da haste com a tubulação, verifica nível de severidade exibido em uma tela ao usuário, sendo possível ouvir o ruído captado através de um fone de ouvido, bem como amplificado por um ganho digital (HUNAIDI *et al.*, 2000). A haste de escuta é menos sensível que o geofone quando utilizado em contato com o solo, ou seja, para medições de superfície (GONÇALVES; ALVIM, 2007).

A capacidade técnica do operador para uma interpretação adequada do sinal auscultado pelo mesmo possui grande influência na detecção e localização do vazamento. Por se tratar de um instrumento que fornece como resultado somente o ruído do sinal em forma de áudio, este pode ser corrompido facilmente pela presença de qualquer outro tipo de ruído nas proximidades analisadas dificultando sua detecção e posterior localização. Logo se faz necessário a presença de um profissional treinado e com experiência para que o resultado obtido seja eficiente e localização do vazamento eficaz.

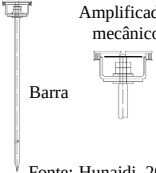
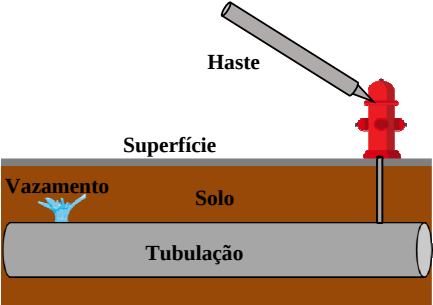
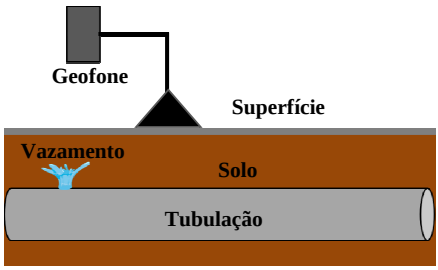
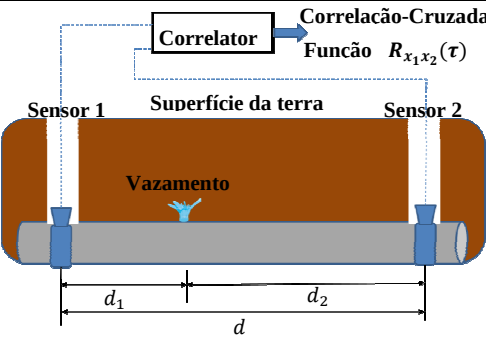
Tipo		Foto	Esquema
Haste	Analógica	 Amplificador mecânico Barra Fonte: Hunaidi, 2000	 Haste Superfície Vazamento Solo Tubulação
	Digital	 Indicador de nível Nível sonoro Bateria Saída de sinal Entrada do fone Liga/desliga Volume Haste de contato Fonte: Adaptado do manual do produto	
Geofone	Analógico	 Fonte: Heath Consultants	 Geofone Superfície Vazamento Solo Tubulação
	Digital	 Fonte: Yamatec	
Correlacinador	Digital	 Fonte: Meta soluções em saneamento	 Correlator Correlação-Cruzada Função $R_{x_1x_2}(\tau)$ Sensor 1 Superfície da terra Sensor 2 Vazamento d_1 d_2 d

Figura 1.2: As principais técnicas acústicas utilizadas. Na primeira coluna encontra-se a identificação da técnica, na segunda suas respectivas imagens (analógica e digital) e na terceira coluna apresenta o esquema de medição de cada um desses equipamentos.

O correlacionador de ruídos é o dispositivo que se baseia na técnica acústica mais elaborada em termos de tecnologia, bem como a de maior custo. Esse sistema consiste em um conjunto de dois sensores conectados a dois pré-amplificadores e uma unidade de processamento onde a função de correlação cruzada é calculada como ferramenta para a estimativa do atraso de sinais medidos entre os sensores (ALMEIDA *et al.*, 2017). A posição de vazamento pode ser identificada utilizando a estimativa do atraso entre os sinais de vazamento (YOON; PARK; SHIN, 2012), juntamente com a velocidade com que o mesmo se propaga ao longo do vazamento (HUNAIDI; WANG, 2006).

Apesar de ser uma ferramenta efetiva na detecção e localização de vazamentos, ela possui algumas limitações. Por se tratar de aproximações, vários fatores podem influenciar em sua eficácia, desde a escolha dos sensores a serem utilizados, problemas de instrumentação, dinâmica do sistema de distribuição de água, até mesmo o tipo de solo em que será realizada a medida (BRENNAN *et al.*, 2018). Por conta disso vários estudos vem sendo realizados nessa área, desde identificar sensores mais adequados para monitoração da vibração do tubo, devido à propagação do ruído de vazamento ao longo do mesmo (SUN *et al.*, 2020); estudo do comportamento vibro-acústico do sistema água-tubulação-solo e sua influência na propagação do ruído de vazamento, com o auxílio de um modelo numérico desenvolvido (BRENNAN *et al.*, 2017); melhorias na forma da função de correlação cruzada para detecção de vazamento em um tubo usando sinais acústicos, removendo os efeitos da dinâmica do sistema de distribuição (GAO *et al.*, 2017); entendimento dos efeitos devido ressonâncias na estimativa de atraso de tempo, utilizando as funções de correlação chamadas de *Basic Cross Correlation* (BCC) e *Phase Transform* (PHAT), sendo a BCC a mais robusta entre elas (ALMEIDA *et al.*, 2017); investigações analítica, numérica e experimental afim de identificar os efeitos físicos que o solo exerce na propagação do ruído de vazamento na tubulação, principalmente na velocidade e atenuação do ruído de vazamento (BRENNAN *et al.*, 2018), que interfere diretamente na banda de frequência em que pode-se encontrar o vazamento; estimativa precisa do tempo de atraso de um ruído de vazamento mesmo que os sinais apresen-

tem quantização (clipagem e número de BITS) durante a medição (BRENNAN *et al.*, 2019); ou até mesmo a utilização da Análise de Componentes Principais (PCA - *Principal Component Analysis* em conjunto com sinais de emissão acústica, para detectar e localizar vazamentos (DIAO *et al.*, 2020).

1.2.3 Algumas pesquisas realizadas no Brasil sobre o assunto

Nessa seção serão abordados alguns dos principais estudos com ênfase na detecção de vazamentos realizados do Brasil.

Utilização de series de pressão e controle estatístico

Essa técnica consiste em utilizar as ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), em conjunto com o processo de controle estatístico aplicado à série de pressões. A pesquisa foi realizada em Fortaleza, onde a adoção do SIG possibilitou a organização e manipulação de grandes quantidades de dados operacionais e comerciais em uma única plataforma georreferenciada, obtendo um banco de dados representativo do sistema (LIRA, 2019).

A partir do banco de dados, aplicou-se método de controle estatístico, em especial o cálculo de Média e Variância móvel Exponencialmente Ponderada (MVMEP), em séries de sinais de pressão obtidos através dos monitoramentos realizados. Porém os resultados não se mostraram muito animadores já que a detecção de vazamentos ficou na ordem de 60%, quando comparado com os reporte de ocorrência operacional (LIRA, 2019).

Análise Espectral de Transientes de Pressão

Esse estudo foi baseado na análise espectral de sinais de pressão adquiridos em locais estratégicos da tubulação que favorecem a formação de ondas estacionárias (SOUZA, 2002). Pela análise ser baseada no espectro do sinal, e não no domínio do tempo, possibilita a identificação do vazamento mesmo quando este ocorre durante a realização de operações, que naturalmente encobririam o transiente de pressão gerado pelo vazamento

(SOUZA, 2002).

O resultado mostrou que a análise espectral dos transientes de pressão, em conjunto com o conhecimento prévio dos pontos de reflexão presentes na tubulação, consiste em um método simples e eficiente de se detectar vazamentos (SOUZA, 2002).

Pressões manométricas

A metodologia apresentada neste estudo, consiste em medir as pressões manométricas em pontos das redes de distribuição enterrada através dos ramais de entrada de água dos prédios com o intuito de encontrar possíveis vazamentos (CHAGAS, 2018). A partir do fluxo de entrada nos ramais calcula-se a vazão de cada trecho pela Fórmula de Hazen-Williams, dessa forma a comparação das vazões mostrará os trechos com possíveis vazamentos de água (CHAGAS, 2018).

GPR (Ground Penetrating Radar)

Esse método consiste no conceito de que a propagação de ondas elétricas no solo é capaz de fornecer perfis contínuos e de alta resolução das características da subsuperfície, num alcance pequeno, centímetros, ou até centena de metros. A aplicação do método GPR teve como objetivo avaliar a sua aplicabilidade no conhecimento da subsuperfície e na detecção de anomalias elétricas que poderiam estar relacionadas a vazamentos da rede de distribuição de água (SOUZA *et al.*, 2006).

Os ensaios foram realizados utilizando GPR modelo RAMAC com antena blindada na frequência central de 250 MHz onde a aquisição de dados em campo foi facilitada por meio do uso de um carrinho que possui um hodômetro acoplado em uma de suas rodas, juntamente com um GPS geodésico para fornecer com maior exatidão a localização dos perfis GPR adquiridos (SOUZA *et al.*, 2006). Os resultados para identificação dos possíveis pontos de vazamento da rede não foram tão específicos, devido a alguns fatores, dentre eles, as propriedades dos solos e a possibilidade da existência de um aquífero confinado (SOUZA *et al.*, 2006).

Sistema de reconhecimento de padrões

O objetivo dessa técnica é fazer detecção de vazamentos baseada na análise de sinais, adquiridos junto ao circuito hidráulico experimental controlado, pelo monitoramento das redes durante sua operação. O ambiente controlado permitiu a simulação da ocorrência de um vazamento na rede, armazenando todos os sinais adquiridos em uma grande base de dados (MEDINA, 2017).

A partir da base de dados e da utilização da ferramenta de *machine learning*, através do reconhecimento de padrões, utilizando a diversas técnicas como a extração de características no domínio do tempo e na decomposição da distribuição de energia nos componentes (*wavelet*), foi possível a obter um desempenho acertado superior a 90% (MEDINA, 2017).

Sistema robotizado autônomo para inspeção de tubulações

O objetivo foi alcançar uma solução de baixo custo que pudesse ser amplamente utilizada para auxiliar nas inspeções de tubulações, afim de encontrar possíveis vazamentos. O Robô foi desenvolvido abordando o uso de elementos como microcontrolador, motores de corrente contínua, alimentação, sensores de distância infravermelho e um acelerômetro (PINTO, 2017).

A solução criada envolveu o desenvolvimento de um método de controle de posição utilizando um método de aprendizagem por reforço, o Q-Learning, que permite o robô percorrer a tubulação sem tombar, apenas utilizando um giroscópio, permitindo o robô chegar mais rápido na posição desejada e a permanecer por mais tempo nessa posição, apesar das irregularidades e sujeira da tubulação (PINTO, 2017). Esse método mostrou-se capaz de conseguir detectar falhas com apenas 2 mm de espessura em suas inspeções (PINTO, 2017).

Técnicas vibro-acústicas de detecção de vazamentos

Recentemente, em 2015, foi criado um grupo de pesquisa na UNESP contando com financiamento de uma proposta PITE FAPESP-SABESP cujo principal objetivo é investigar melhorias em técnicas vibro-acústica. O projeto em questão foi focado no desenvolvimento de um correlacionador nacional de ruído de vazamento. Essa técnica utiliza dois sinais gerados pela presença de um vazamento e coletados via dois sensores distintos e sincronizados, montados em pontos de acesso específicos. As principais técnicas de processamento de sinais utilizadas são o espectro cruzado de potência, capaz de calcular a estimativa da banda de frequência efetiva de um sistema, e a correlação cruzada, ferramenta responsável pela informação do atraso de sinal no domínio do tempo.

Grande parte dos estudos estão focadas na detecção de vazamentos em tubos plásticos de distribuição de água. As pesquisas estão relacionadas ao papel da vibro acústica na detecção de vazamentos (BRENNAN *et al.*, 2017); os efeitos das ressonâncias na estimativa de atraso de tempo do sinal (ALMEIDA *et al.*, 2017); melhoria na forma da função de correlação cruzada para detecção de vazamentos utilizando sinais acústicos (GAO *et al.*, 2017); os efeitos das propriedades do solo exercem na propagação do ruído de vazamento (BRENNAN *et al.*, 2018); até mesmo no desenvolvimento de uma plataforma de teste de tubo virtual capaz de simular a vibração do tubo proveniente de vazamentos de água (BRENNAN *et al.*, 2016).

1.2.4 Uso da Internet das coisas IoT

Em um passado não tão distante filmes e desenhos faziam com que a mente de quem os assistisse imaginasse casas totalmente automatizadas onde as funcionalidades ganhavam vida a partir de um simples toque de botões ou comando de voz, carros que guiavam sozinhos, máquinas operando sem a presença humana, e tudo isso não passava de uma ficção. Hoje em dia estão cada vez mais presentes no dia a dia das pessoas através da Internet das Coisas ou *Internet of Things (IoT)*.

A Internet das Coisas simplifica os objetos do dia a dia, com competência computacional e de comunicação. Essa conexão possibilita controlar remotamente os objetos, e acessá-los como provedores de serviços, tornando-os objetos inteligentes (MANCINI, 2018). A IoT já é uma realidade presente nos dias atuais e não somente pelos computadores que estão conectados à internet, ou a grande diversidade de equipamentos, tais como TVs, *laptops*, geladeira, fogão, eletrodomésticos, automóveis, *smartphones* disponíveis no mercado. Com o uso dos objetos inteligentes abre-se uma gama de novas possibilidades de aplicações, como, por exemplo, cidades inteligentes (*smart cities*); saúde (*smart healthcare*); casas inteligentes (*smart home*) e desafios emergem (regulações, segurança, padronizações) (MANCINI, 2018).

Essa ferramenta está cada vez mais presente como uma forma de monitorar e preservar os recursos naturais, identificando, através do monitoramento constante, possíveis desperdícios. Esses dispositivos auxiliam principalmente na gestão e planejamento desses recursos. Na área de vazamentos, a maioria desses dispositivos, visam monitorar constantemente o fluxo de água de determinada região, possibilitando assim a identificação de possíveis anomalias.

Em (WADEKAR *et al.*, 2016) apresenta um dispositivo IoT que pode ser instalado em redes residenciais que ajuda no gerenciamento e planejamento do uso da água. Nesse sistema, sensores foram colocados em um tanque que informam continuamente o nível da água no momento atual. Esta informação é atualizada constantemente, usando um aplicativo via *Android*, onde o usuário pode visualizar o nível da água do seu *Smartphone* em qualquer lugar conectado à Internet. De acordo com o nível de água do tanque, o motor da bomba de água é controlado automaticamente. Em nível baixo, o motor é ligado, bombeando a água para o tanque, e quando o tanque estiver prestes a encher, o motor é desligado.

No trabalho de (JUNIOR, 2017), foi desenvolvida uma rede composta por sensores sem fio capazes de medir o fluxo de água de determinada rede de distribuição. A proposta se baseou em criar um grande banco de dados a partir da coleta do fluxo e

vazão da água, de forma a serem gerenciados, processados e analisados, posteriormente, permitindo identificar trechos da rede de distribuição apresentaram falhas.

Assim como no trabalho de Junior em 2017, o trabalho de Leal de 2019 também aplicou ferramentas de IoT para identificar vazamentos através da análise de fluxo e vazão de água, mas com o incremento da análise por pressão do fluido. Constatou-se nesse trabalho que as leituras de pressão se mantiveram inalteradas independentemente de vazamentos na rede de simulação ou não; indicando que o sensor utilizado para pressão não é adequado para identificação de rompimentos da rede (LEAL, 2019).

Em (AZEVEDO; MACIEL; GAMA, 2018) foi apresentada o IoT como solução para o monitoramento, em tempo real, de poços subterrâneos. A análise dos dados obtidos e da geração de histórico (banco de dados), possibilitou um estudo do comportamento dos aquíferos subterrâneos da Região Metropolitana de Recife. Nesta rede, foram instalados hidrômetros, módulos de comunicação remota, que permitem a comunicação com um sistema informatizado, e sondas que permitem o monitoramento do nível e da salinidade da água destes poços. De posse desses dados e com a aplicação de técnicas de análise de dados, foi possível verificar o consumo, os níveis de condutividade, dentre outras características que tornaram possível prever quais aquíferos estão sendo impactados e de que forma, permitindo a tomada ações preditivas.

Seguindo essa mesma lógica, uma cidade localizada no estado americano da Califórnia chamada Fountain Valley implementou restrições do uso de água, dando descontos para conservação e aplicando restrições de irrigação, para incentivar os moradores a economizar água. Para rastrear essas medidas, a Fountain Valley implantou uma rede de água inteligente “*Sensus*”, incluindo o sistema de comunicação entre os medidores e comerciais. Esse sistema permitiu reduzir o uso da água e identificar a presença de vazamentos. Por meio de uma combinação de liderança, comprometimento do cidadão e tecnologia Sensus, o Fountain Valley excedeu conseguiu reduzir em aproximadamente em 23% o consumo (SENSUS, 2016).

1.2.5 Uso do Microprocessador Raspberry Pi

Raspberry Pi é um computador do tamanho de um cartão de crédito, que se conecta a um monitor de computador ou Tv. Desenvolvido pelo engenheiro britânico Eben Upton e sua equipe de *hardware* no Reino Unido (HEIN, 2013), possui *hardware* integrado numa única placa de circuito impresso. Esse microcomputador é uma ferramenta bastante interessante e com alto potencial, sobretudo, no ensino e no desenvolvimento da arquitetura dos computadores, das linguagens de programação e até mesmo a nível do entretenimento (CARDOSO; COSTA; SOUSA, 2013). Os sistemas operacionais suportados utilizam o núcleo Linux, em sua maioria gratuitos e de código aberto. Há uma imensa liberdade de personalização da máquina e de suas funções por intermédio da linguagem de programação Python (PAIVA; MOREIRA, 2014).

Por se tratar de um microcomputador com capacidade de controlar os sistemas, com um bom desempenho de processamento e possuindo a vantagem de ser compacto e de baixo custo, esse dispositivo é constantemente utilizado em projetos de engenharia. Suas portas GPIO, permitem o acesso a dispositivos externos como sensores, entregam a possibilidade de controlar sistemas externos, como motores, lhe dão uma infinita gama de aplicações principalmente para implementação do uso da *Internet of Things (IoT)*. Um exemplo disso pode ser visto em (ISHAK *et al.*, 2017) onde o *Raspberry Pi* foi utilizado em um projeto de sistema de irrigação inteligente para horta, onde foi integrado a esse dispositivo vários sensores, como sensores de umidade do solo, sensores ultrassônicos e sensores de luz. Esse sistema proposto conseguiu reduzir custos, minimizar as águas residuais e reduzir a interação física humana. O sistema também conseguiu medir a umidade do solo e controlar uma válvula solenoide de acordo com os requisitos estabelecidos.

Em (ZANIBONI, 2009) esse dispositivo é usado como um controlador de núcleo em um processo de monitoramento, em tempo real, da qualidade da água. O sistema é composto por vários sensores ligados ao dispositivo, visando medir parâmetros físicos e

químicos da água. Os valores obtidos dos parâmetros como temperatura, PH, turbidez, condutividade e oxigênio dissolvido da água, podem ser acessados remotamente em tempo real, na internet através da computação em nuvem. Já em (LAGU; DESHMUKH, 2014) foi usado como um sistema inovador e inteligente de controle e monitoramento para estações de tratamento de água, como uma alternativa eficaz a substituição aos CLPs para a automação de pequenas estações de tratamento de água.

Esse dispositivo ainda pode ser usado para auxiliar na gestão e detecção de vazamento de água como em (DORNELAS; CAMPELLO, 2017). O *Raspberry Pi* fez parte da construção de um protótipo para o monitoramento do consumo de água em um ambiente doméstico com o objetivo de mensurar o consumo instantâneo e disponibilizar os dados gerados em tempo real na internet para serem consultados por outras aplicações, dessa forma através do monitoramento contínuo é possível detectar possíveis anomalias no consumo.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada na seguinte forma: no capítulo 2 é apresentado o simulador virtual de ruído de vazamento, que teve como base o modelo analítico que utiliza a teoria de propagação de ondas baseado no trabalho de Brennan et al (2018). No capítulo 3 é feita a descrição do campo de prova utilizado nesse trabalho, bem como as medições e os testes realizados com a haste de escuta. O capítulo 4 mostra as melhorias implementadas na instrumentação e processamento de sinais na haste de escuta, juntamente com os conceitos de internet das coisas. No capítulo 5 apresenta as principais conclusões obtidas sobre o trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros e as publicações ocorridas durante o processo de desenvolvimento.

Capítulo 2

Simulador virtual de ruído de vazamento

Correlacionadores de sinais são dispositivos utilizados para detecção e localização de vazamentos que utilizam a técnica da correlação cruzada, sendo esta uma técnica vibro-acústica. Esses dispositivos utilizam dois sensores para coletar o sinal gerado pela presença do vazamento em pontos de acesso específicos, como por exemplo, hidrantes. Apesar de serem utilizados por mais de 30 anos em detecção de vazamentos em tubos metálicos com elevada efetividade, entretanto, quando aplicados a tubos de plástico essa técnica é drasticamente afetada devido a elevada atenuação do sinal de vazamento que se propaga pelo tubo. Dessa maneira, os sinais vibro-acústicos adquiridos na tubulação são facilmente corrompidos com ruídos espúrios que contaminam a medição. Portanto, para o bom funcionamento dessa técnica, especialmente para tubos de plástico, se faz necessário o uso correto de filtros que atenuem sinais não relacionados aqueles devido à presença do vazamento.

Este capítulo tem como objetivo desenvolver um software utilizando linguagem *Python* e HTML tendo como base o modelo analítico que utiliza a teoria de propagação de ondas baseado no trabalho de Brennan et al (2018). A linguagem de programação *Python* foi escolhida devida a crescente demanda por *softwares open source* do mercado atual. Essa linguagem possui uma ampla biblioteca nativa e externa, fácil interação com a linguagem HTML, além de possuir uma das maiores comunidades ativas da internet.

Esse programa visa estimar a banda de frequência teórica onde encontra-se energia

de vazamento, levando em conta o tipo de geometria e material do tubo, bem como as características do solo ao qual o tubo está enterrado. Como se trata de um problema de vazamento de dutos de distribuição de água, então o fluido transportado pelo tubo não se altera (água).

Dessa maneira pode-se simular situações distintas de problemas envolvendo detecção de vazamentos onde os efeitos das diferentes características construtivas e físicas do tubo, bem como das características físicas do solo podem ser investigados, juntamente com a maneira com que as mesmas afetam a banda de frequência a qual existe energia de vazamento. Para isso são feitas comparações entre os resultados simulados via simulador virtual e medidas reais adquiridas em diferentes campos de prova. A banda de frequência é estimada via módulo do espectro cruzado de potência (CPSD – *Cross-Power Spectral Density*) e a correlação cruzada, onde a informação do atraso de sinal no domínio do tempo está é calculada utilizando a transformada inversa de Fourier da CPSD (módulo e fase). Além de proporcionar um maior entendimento da técnica de correlação cruzada, essa ferramenta poderá ser usada como um passo prévio para saber se é possível empregar correlacionadores de vazamento para uma determinada situação (se houver uma banda de frequência relativamente larga), auxiliando na gestão de perdas de empresas de saneamento e distribuição que utilizam correlacionadores de ruído de vazamento em seu portfólio de metodologias utilizadas na detecção e localização de vazamentos.

2.1 A correlação-cruzada em problemas envolvendo detecção de vazamentos

Técnicas acústicas e vibratórias vêm sendo aplicadas em problemas de localização de vazamentos nos últimos 30 anos (FUCHS; RIEHLE, 1991). A principal técnica acústica se baseia na correlação de dois sinais vibratórios provenientes de um único vazamento para determinar o atraso de sinais. Uma típica instrumentação utilizada na detecção de

vazamentos em tubulações subterrâneas é esquematizada e mostrada na Figura 2.1. A distância entre os sensores é $d = d_1 + d_2$, onde d_1 e d_2 são as respectivas distâncias entre o vazamento e os pontos de medida aqui chamados de P_{01} e P_{02} , onde os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$ são medidos em cada um desses pontos de medidas, respectivamente.

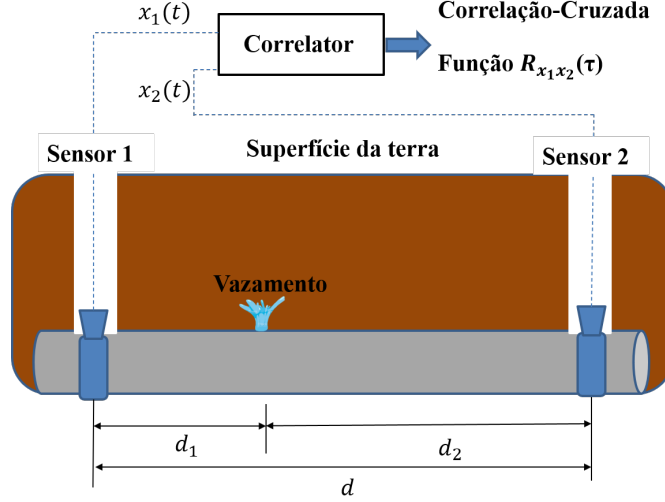


Figura 2.1: Esquema de aquisição dos sinais em problemas de detecção e localização de vazamentos em tubulações de plástico de sistemas de distribuição de água subterrâneos, pela utilização de técnicas acústica/vibratória.

A presença do vazamento pode ser identificada como um distinto pico na função de correlação cruzada entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$. O pico na função de correlação cruzada ocorre no atraso de sinal T_0 , que é a diferença no tempo de chegada dos sinais nos dois sensores. Portanto, esse pico é uma estimativa do atraso de sinais entre os sinais de vazamento medidos nos pontos de medida P_{01} e P_{02} , e juntamente com a velocidade de propagação do ruído de vazamento c e a distância d entre os sensores é utilizado para o cálculo da posição do vazamento em relação a um dos pontos de medida (GAO et al., 2004). A distância do vazamento em relação ao sensor 1, localizado d_1 distante do vazamento, pode ser então calculada por (FUCHS; RIEHLE, 1991).

$$d_1 = \frac{d - cT_0}{2} \quad (2.1)$$

Geralmente hidrantes ou válvulas de controle conectados a tubulação são os pontos de medição disponíveis em situações reais.

Como mencionado anteriormente, a técnica da correlação cruzada é efetiva na detecção de vazamentos em tubos metálicos, porém, tal efetividade é drasticamente afetada em tubos de plásticos (GAO *et al.*, 2004). Este fato pode ser atribuído a dois importantes fatores: o primeiro deve-se à considerável incerteza em relação ao valor da velocidade de propagação de onda em tubos de plástico no momento em que a procura do vazamento é realizada, visto que, tal valor precisa ser conhecido *a priori* para que os métodos acústicos/vibratórios possam ser efetivos (BRENNAN MICHAEL J, 2005). O segundo aspecto deve-se ao fato de que o ruído provocado pelo vazamento não se propaga a longas distâncias em tubos de plástico, como observado em tubulações metálicas, devido à drástica atenuação do sinal vibratório proveniente do vazamento. Essa atenuação ocorre devido diferentes formas de dissipação de energia do sinal vibratório/acústico, como investigados por Muggleton et al. (2002/2005). Ressalta-se também que tal atenuação é o principal fator que afeta a largura de banda onde é possível encontrar ruído de vazamento correlacionado entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$.

Portanto esse trabalho visa utilizar um modelo analítico teórico de propagação de ondas, baseado no trabalho de Brennan et. Al (2018) para estimar a banda de frequência efetiva (BFE), ou seja, a banda de frequência onde existe energia correlacionada no sinal de vazamento medido pelos sensores alocados nos pontos de medida. Essa banda é calculada utilizando a informação da densidade espectral cruzada entre esses dois sinais. O atraso de sinal, entretanto, é estimado via pico da correlação cruzada ou via gradiente da fase da CPSD, que são estimativas realizadas no domínio do tempo e da frequência, respectivamente. Na seção seguinte será descrito o modelo utilizado, juntamente com o processamento de sinal clássico utilizado.

2.2 Número de onda para um tubo enterrado

Para entender como o modelo desenvolvido por Brennan et al. (2018) funciona, utiliza-se um desenho esquemático de um tubo enterrado como o mostrado na Figura 2.2.

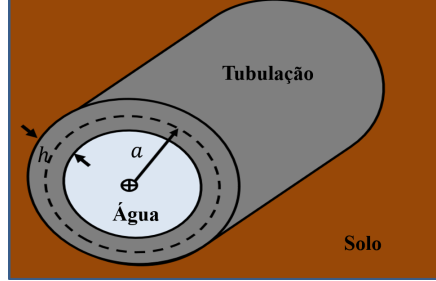


Figura 2.2: Esquema de um tubo enterrado transportando água.

É possível notar o fluido sendo transportado pelo tubo, que neste caso é a água, bem como a geometria do tubo e o solo ao redor do mesmo. O fluido é caracterizado pelo seu módulo de Bulk B_{agua} . O tubo pode ser caracterizado em relação a sua geometria e seu material. A geometria é caracterizada pelo raio médio a e a espessura de parede h . Entretanto, o material da tubulação é definida pela densidade ρ_{tubo} e o módulo de Young complexo $E^* = E(1 + j\eta_{tubo})$, em que E é o módulo de elasticidade e η_{tubo} é o fator de perda do tubo que varia de acordo com o material. O módulo de elasticidade e E é o fator de perda do tubo que varia de acordo com o material. O solo, por sua vez, é caracterizado pela sua densidade ρ_{solo} , pelo módulo de Bulk complexo $B_{solo}^* = B_{solo}(1 + j\eta_d)$, onde B_{solo} é o módulo de Bulk real do solo e η_d é o fator de perda dilatacional do solo, e pelo seu módulo de cisalhamento complexo $G_{solo}^* = G_{solo}(1 + j\eta_c)$, onde G é o módulo de cisalhamento real e η_c é o fator de perda devido cisalhamento do solo. O número onda para esse problema pode ser calculado por (BRENNAN *et al.*, 2018)

$$k = k_{agua} \left(1 + \frac{K_{agua}}{K_{solo} + K_{tubo}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

onde $k_{\acute{a}gua} = \omega/c_s$ é o número de onda da água, c_s é a velocidade do som na água, que no caso é de 1500 m/s. Os termos $K_{\acute{a}gua} = 2B_{\acute{a}gua}/a$, $K_{tubo} = E^*h/a^2 - \rho_{tubo}h\omega^2$ e $K_{solo} = K_1 + K_2 + K_3$ são as rigidezes dinâmicas da água, solo e tubo, respectivamente. Os componentes (rigidezes dinâmicas) que se somam para formar a rigidez dinâmica do solo é dado por (BRENNAN *et al.*, 2018)

$$K_1 = \left(B_{solo}^* - \frac{2G^*}{3} \right) \frac{k_d^2}{k_r^2} \left(1 - 2\frac{k^2}{k_r^2} \right) \frac{Y_0(k_d^r a)}{Y_0'(k_d^r a)} \quad (2.3a)$$

$$K_2 = -2G^* k_d^r \left(1 - 2\frac{k^2}{k_r^2} \right) \frac{Y_1'(k_d^r a)}{Y_1(k_d^r a)} \quad (2.3b)$$

$$K_3 = -4G^* k_r^r \frac{k^2}{k_r^2} \frac{Y_1'(k_r^r a)}{Y_1(k_r^r a)} \quad (2.3c)$$

Os termos $k_d^r = \sqrt{k_d^2 - k^2}$ e $k_r^r = \sqrt{k_r^2 - k^2}$ são referentes aos números de onda radial, onde k_d e k_r são os números de onda dilatacional e cisalhante no solo, respectivamente. Os parâmetros $Y_0(\bullet)$ e $Y_1(\bullet)$ são funções de Hankel de segunda ordem, e $'$ denota derivada espacial. Essa função de Hankel é relaciona com as ondas cônicas que se propagam no solo, diferente do tubo onde ondas longitudinais são a responsáveis pela propagação da energia do vazamento.

2.3 Definição da banda de frequência efetiva teórica para sinais de vazamento

Para uma seção do tubo enterrado, a função resposta em frequência (FRF- *Frequency Response Function*) é dada por (GAO *et al.*, 2004).

$$H(\omega, x) = (i\omega)^n e^{-j\omega x/c} e^{-\omega\beta x} \quad (2.4)$$

onde x é a distância do vazamento ao ponto de medição, $c = \omega / R_e \{k\}$ é a velocidade do vazamento e $\beta = -Im \{k\} / \omega$ é a atenuação da onda responsável pela propagação da energia do vazamento. O termo $(i\omega)^n$ está relacionado com o tipo de sensor utilizado podendo n assumir os valores de 0, 1 ou 2 para medidas de pressão sonora/deslocamento, velocidade e aceleração, respectivamente. Em problemas reais de detecção de vazamento, utiliza-se o espectro cruzado de potência (CPSD – *Cross Power Spectral Density*) para análise de sinais de vazamento, como por exemplo, a faixa de frequência onde o sinal de vazamento é encontrado. Essa banda de frequência é aqui denominada banda de frequência efetiva (BFE). Para essa faixa (banda) de frequência, encontra-se a energia do sinal de vazamentos correlacionadas e medidas com os dois sensores conectados a tubulação nos pontos de medida, ou seja, é a faixa de frequência desejada para selecionar os limites da banda de frequência. A CPSD pode ser calculada teoricamente como (ALMEIDA *et al.*, 2014)

$$S_{x_1x_2}(\omega) = S_u(\omega)H_1^*(\omega, d_1)H_2(\omega, d_2) \quad (2.5)$$

onde S_u é a auto densidade espectral do ruído de vazamento e '*' denota complexo conjugado. O termo $(i\omega)^n$ está relacionado com o tipo de sensor utilizado podendo n assumir os valores de 0, 1 ou 2 para medidas de pressão sonora/deslocamento, velocidade e aceleração, respectivamente. A CPSD possui a informação da “energia” relacionada entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$ que pode ser encontrada analisando seu módulo, bem como, também possui informação da fase entre esses sinais. O gradiente dessa última está relacionado com o atraso de sinais. Portanto, para estimar a banda de frequência utilizar-se-á somente o módulo da CPSD, não se aprofundando muito na importância da fase na detecção de vazamentos. Considera-se que o ruído de vazamento possua característica de ruído branco, ou seja, possua uma característica espectral abrangente em todas as frequências e com amplitude constante, de modo que $S_u = S_0$, sendo S_0 uma constante (Gao et al, 2004). Uma maneira de se estimar a banda de frequência efetiva de maneira

automática, é utilizando o módulo normalizado da CPSD

$$\left| \bar{S}_{x_1 x_2}(\omega) \right| = \frac{|S_{x_1 x_2}(\omega)|}{\max(|S_{x_1 x_2}(\omega)|)} \quad (2.6)$$

onde $\max(\bullet)$ é o máximo da função. O limite inferior e superior da BFE teórica é calculado quando se obtém $\left| \bar{S}_{x_1 x_2}(\omega) \right| \geq 0.1$, como definido por Almeida et al (2014). O módulo da CPSD teórico para um sinal de pressão sonora/deslocamento, velocidade e aceleração é mostrado nas Figuras 2.3(a), 2.3(b) e 2.3(c), respectivamente. Nota-se que o tubo/solo se comporta como um filtro passa baixa para sinais de pressão sonora/deslocamento e do tipo passa-banda para sinais de velocidade e aceleração, sendo a banda deste último englobando mais alta frequência (Almeida et al., 2015).

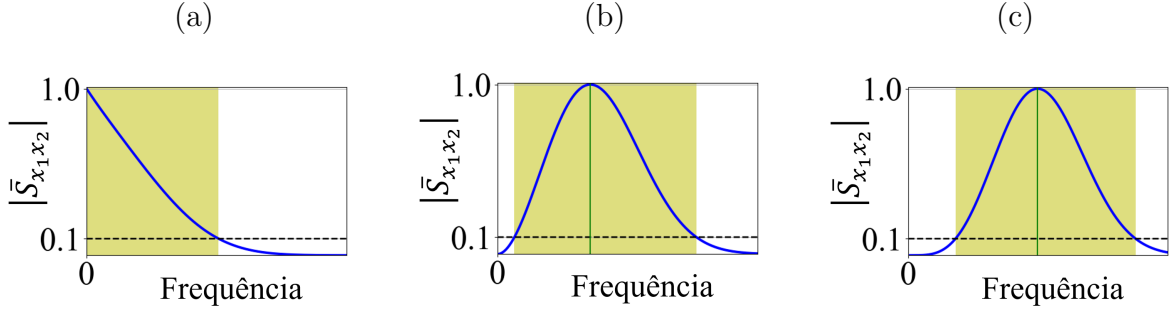


Figura 2.3: Banda de frequência estimada. (a) Utilizando um hidrofone como sensor. (b) Utilizando um geofone como sensor. (c) Utilizando um acelerômetro como sensor. (A linha azul corresponde ao sinal processado, a área sombreada indica a banda de frequência efetiva do sistema, e a linha preta pontilhada indica onde $\left| \bar{S}_{x_1 x_2} \right| = 0.1$).

As CPSDs mostradas na Figura 2.3 são utilizadas para ilustrar qualitativamente o módulo normalizado da CPSD. Entretanto, ressalta-se que para o cálculo do módulo da CPSD utilizando o modelo teórico descrito nessa seção é necessário fornecer a distância entre os sensores, qual o tipo de sensor empregado, o tipo de fluido, material do tubo e sua geometria, e as propriedades do solo ao qual o tubo está enterrado. São esses parâmetros que *software* aqui desenvolvido utiliza para simular os diferentes casos para verificação da efetividade do uso de correlacionadores na detecção de vazamentos.

2.4 Cálculo da correlação cruzada: processamento de sinais clássico

Para complementar os dados do simulador de vazamentos, faz-se necessário o cálculo da correlação cruzada que é empregada para a estimativa do atraso de sinais entre aqueles adquiridos pelos sensores do correlacionador de ruídos de vazamento. A função de correlação cruzada pode ser calculada utilizando a inversa de Fourier do espectro cruzado de potência (CPSD), como segue

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{x_1x_2}(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} |S_{x_1x_2}(\omega)| e^{-\omega T_0} d\omega \quad (2.7)$$

Essa maneira de escrever a função da correlação cruzada é conveniente para mostrar que a mesma é função do módulo e da fase da CPSD, sendo que esta última possui a informação do atraso de sinal dado pelo seu gradiente. Uma vez que a multiplicação no domínio da frequência corresponde à convolução no domínio do tempo, pode-se também escrever a correlação cruzada da seguinte maneira:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = S_0 \psi(\tau) \otimes \delta(\tau + T_0) \quad (2.8)$$

onde $\otimes$ denota convolução, $\psi(\tau) = F^{-1}\{|H_1^*(\omega, d_1)H_2(\omega, d_2)|\}$ e $\delta(\tau + T_0) = F^{-1}\{e^{-\omega T_0}\}$, sendo $\delta(\bullet)$ a função delta de Dirac, $F^{-1}\{\}$ a transformada inversa de Fourier e, τ o atraso do sinal. A interpretação da Eq. 2.8 é que a função $\delta(\tau + T_0)$ é deslocada por T_0 (pico da correlação cruzada) e possui sua forma (pulso de área unitária) espalhado/alargado pela característica do espectro de vazamento $S_{II}(\omega)$, que aqui foi aproximado com características espectrais de ruído branco S_0 como já mencionado anteriormente. Além do mais, a natureza de $\psi(\omega)$ também afeta diretamente a forma da correlação cruzada. É nesse termo que as características do tubo/solo influenciam na banda a qual existe energia de vazamento, ou seja, afeta diretamente a correlação cruzada.

Devida a elevada atenuação nos sistemas de tubulação de plástico, tanto a distância

que o ruído de vazamento pode se propagar ao longo do tubo enterrado, bem como, “altas” frequências são reduzidas. Na prática, as operações da filtragem de banda são realizadas para atenuar os sinais fora da faixa de frequência de interesse onde sinais não relacionados ao ruído de vazamento estão presentes e podem corromper a estimativa do atraso de sinais. Para simplificar a análise de sinais envolvida utiliza-se um filtro passa-banda ideal, na forma de uma janela quadrada, para remover o ruído fora da faixa de interesse. O comportamento do espectro de frequência desse filtro é descrito por

$$\begin{aligned} g(\omega) &= 1 \quad \text{para } \omega_0 \leq \omega < \omega_1 \\ &= 0 \quad \text{para outros valores} \end{aligned} \quad (2.9)$$

onde ω_0 e ω_1 são os limites inferior e superior do filtro passa-banda. Adicionando os efeitos da banda de filtragem à Eq. 2.8 tem-se:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = S_0\psi(\tau) \otimes \delta(\tau + T_0) \otimes g(\tau) \quad (2.10)$$

onde $g(\tau) = F^{-1}\{G(\omega)\}$ que é caracterizado por ser uma função do tipo sinc. O efeito do filtro é similar aquele do módulo da CPSD. Quanto menor for a banda de frequência maior é sua influência e flutuações laterais podem ter amplitudes similares ao pico da correlação cruzada onde a informação do atraso de sinal está localizada, criando certa ambiguidade.

2.5 *Software* para teste virtual do uso de correlacionadores

O modelo de propagação de ondas, juntamente com as ferramentas de análise de sinais descritos nas seções anteriores serão aqui utilizados como base do cálculo estimado da BFE teórica visando auxiliar na definição do uso ou não de correlacionadores de sinais em problemas de detecção de vazamento antes da aplicação dos mesmos em campanhas de detecção de vazamentos. Isso pode ser feito analisando a largura da BFE, que se for

muito estreita, por exemplo, menor que 50 Hz, eleva a incerteza do cálculo estimado do atraso de sinal pela pouca “amostra” de dados, bem como, pela grande interferência do filtro passa-banda utilizado para filtrar ruídos espúrios. A programação do *software* foi desenvolvida em *Python* (modelagem e processamento de sinais) e a interface do *software* com o usuário via HTML. As informações mais técnicas referentes a construção do *software* estão disponíveis no apêndice A.

O *software* tem como objetivo prover uma interface intuitiva e de fácil manuseio de forma a simular casos utilizando o modelo de propagação de onda e processamento de sinais descritos nas seções anteriores. Dessa forma para que seja feita a simulação, o usuário precisa informar alguns parâmetros como dados de entrada.

Um desses parâmetros é o tipo de sensor utilizado, que pode ser hidrofone, geofone ou acelerômetro. Algumas características geométricas da tubulação também precisam ser levadas em consideração. Entretanto segundo a Norma Técnica "Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público"(NBR 12218), o diâmetro externo mínimo que pode ser utilizado nos condutos secundários de abastecimento de água é de 50 mm, com uma espessura de 1,6 mm. Esses valores são utilizados como valores padrão inicial (default). Outra característica importante da tubulação, é o seu tipo de material, sendo que os principais utilizados em rede de distribuição de água são PVC (*polyvinyl chloride*), MDPE (*medium-density polyethylene*), ferro fundido e concreto, sendo o PVC o mais comum em distribuição de água localizados no interior de São Paulo. As propriedades para cada tipo de solo e material utilizado estão presentes nas Tabelas 2.1 e 2.2 respectivamente. Esses valores são valores médios obtidos em normas. Para a simulação do tubo considerando o mesmo sem solo ao redor, ou seja, somente "ar", foi utilizado o modelo chamado de in vácuo (GAO et al., 2004).

Solo	Bulk (N / m^2)	Densidade (kg / m^3)	Cisalhamento (N / m^2)
Arenoso	$4.7 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^7$
Argiloso	$4.5 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^3$	$2.41 \cdot 10^8$

Tabela 2.1: Módulo de Bulk, densidade e módulo de cisalhamento para cada tipo de solo.

Material	Módulo de Young (N/m^2)	Densidade (kg/m^3)	Fator de perda	Poisson
PVC	$4 \cdot 10^9$	1450	0.06	0.4
MDPE	$2 \cdot 10^9$	930	0.06	0.4
Ferro	$170 \cdot 10^9$	7800	0.001	0.25
Concreto	$20 \cdot 10^9$	2240	0.06	0.205

Tabela 2.2: Propriedades, utilizadas nos cálculos, de cada material da tubulação.

O programa, assim como todo modelo, conta com algumas considerações/simplificações para que os resultados simulados sejam condizentes com as aproximações dos casos reais. Nesse *software*, para que essas suposições sejam atendidas, se faz necessário que o valor da frequência máxima de análise seja equivalente a um quarto da frequência estimada do anel do tubo, termo corresponde ao valor onde o comprimento de onda é igual a circunferência do tubo. Os resultados apresentados pelo modelo para valores de frequência maiores que 25% da frequência do anel não são mais representativos do sistema.

2.6 Simulações

Tendo como base as seções anteriores apresentadas nesse capítulo, foram feitas algumas simulações no *software* comparando as mesmas com sinais de vazamentos adquiridos em três diferentes campos de prova. Esses dados serão comparados via módulo normalizado da CPSD e sua fase, e também a correlação cruzada.

No primeiro caso, a aquisição foi realizada no campo de prova da SABESP de São Paulo, capital. O campo de prova conta com uma tubulação de PVC com 71,6 mm de diâmetro externo e 3,4 mm de espessura de parede. Essa tubulação está enterrada em um solo do tipo argiloso, e foram utilizados sensores do tipo acelerômetros no ponto P1 ao lado do vazamento e P2 a 5,5m do vazamento. O esquema da medição e os resultados estão apresentados na Figura 2.4(a), e a Figura 2.4(b), 2.4(c) e 2.4(d) mostram o módulo normalizado, sua fase e a correlação cruzada, respectivamente. O índice “i” é relativo a medição realizada no campo de prova da SABESP. Observa-se que o módulo normalizado da CPSD apresenta uma tendência bem próxima do sinal real e que, o BFE (banda de frequência efetiva) é bem estimada pelo valor base de 0,1 do módulo da CPSD

normalizada. A fase real medida se comporta de uma maneira linear dentro da BFE, com pequenas oscilações devido ruídos externos e dinâmica do sistema. A correlação cruzada também é muito próxima do real, enfatizando que os dados simulados são fidedignos com aquele apresentado pela medição.

No segundo caso, legenda “ii” da Figura 2.4, a aquisição foi realizada no campo de prova da SABESP de Tupã. O campo de prova conta com uma tubulação de PVC com 60 mm de diâmetro externo e 3,3 mm de espessura de parede. Essa tubulação não se encontra enterrada, nessa simulação assumiu-se que a tubulação esteja no ar, utilizando o modelo in vácuo da GAO et al.,2004. Os sensores utilizados foram do tipo acelerômetros no ponto P1 a 3m ao lado esquerdo do vazamento e P2 a 3m do lado direito ao vazamento, ou seja, são equidistantes levando $T_0 = 0$ assim como mostrado na Figura 2.4a(ii). O módulo normalizado simulado também possui uma tendência similar com aquele calculado utilizando o sinal real. A BFE é bem estimada pelo módulo, enfatizando a robustez do modelo de propagação de onda implementado como mostrado na Figura 2.4b(ii). A fase real apresenta o comportamento linear com gradiente nulo, com flutuações ao redor da origem devido a dinâmica do sistema, reflexões de onda e ruídos espúrios assim como mostrado na Figura 2.4c(ii). Além do mais, nota-se que em torno de 2.5kHz existe um desvio adicional na fase, que é devido a presença de uma segunda onda propagante no sistema, que não está presente no modelo implementado. Apesar de possuir o mesmo atraso de sinais (pico) da correlação cruzada, a correlação cruzada real possui muitas oscilações ao redor do pico principal devido a presença dos ruídos espúrios, reflexão entre outros conforme mostrado na Figura 2.4d(ii).

O terceiro caso, a aquisição foi realizada no campo de prova da Inglaterra. O campo de prova conta com uma tubulação de MDPE com 160 mm de diâmetro externo e 9,8 mm de espessura de parede. Essa tubulação está enterrada em um solo do tipo arenoso, e foram utilizados sensores do tipo acelerômetros no ponto P1 ao lado do vazamento e P2 a 30m do vazamento assim como mostrado na Figura 2.4a(iii). Assim como nos casos anteriores a CPSD normalizada, a fase da CPSD e a correlação cruzada do sinal

simulado apresenta características similares dos sinais medidos, enfatizando a robustez do modelo e *software* desenvolvido.

Como pode-se observar a partir dos casos exemplos mostrados na Figura 2.4, o modelo computacional presente no *software* estima com relativa precisão a densidade espectral cruzada (módulo e fase) e o atraso do sinal de situações reais (pico da correlação cruzada). Dessa forma, a ferramenta permite, de forma previa, que o usuário verifique a possibilidade da empregabilidade dos correlacionadores de acordo com as especificidades de cada situação, nutrindo-o de informações, que anexadas a sua expertise, são capazes de lhe poupar tempo, identificando a melhor ferramenta a ser utilizada para cada situação.

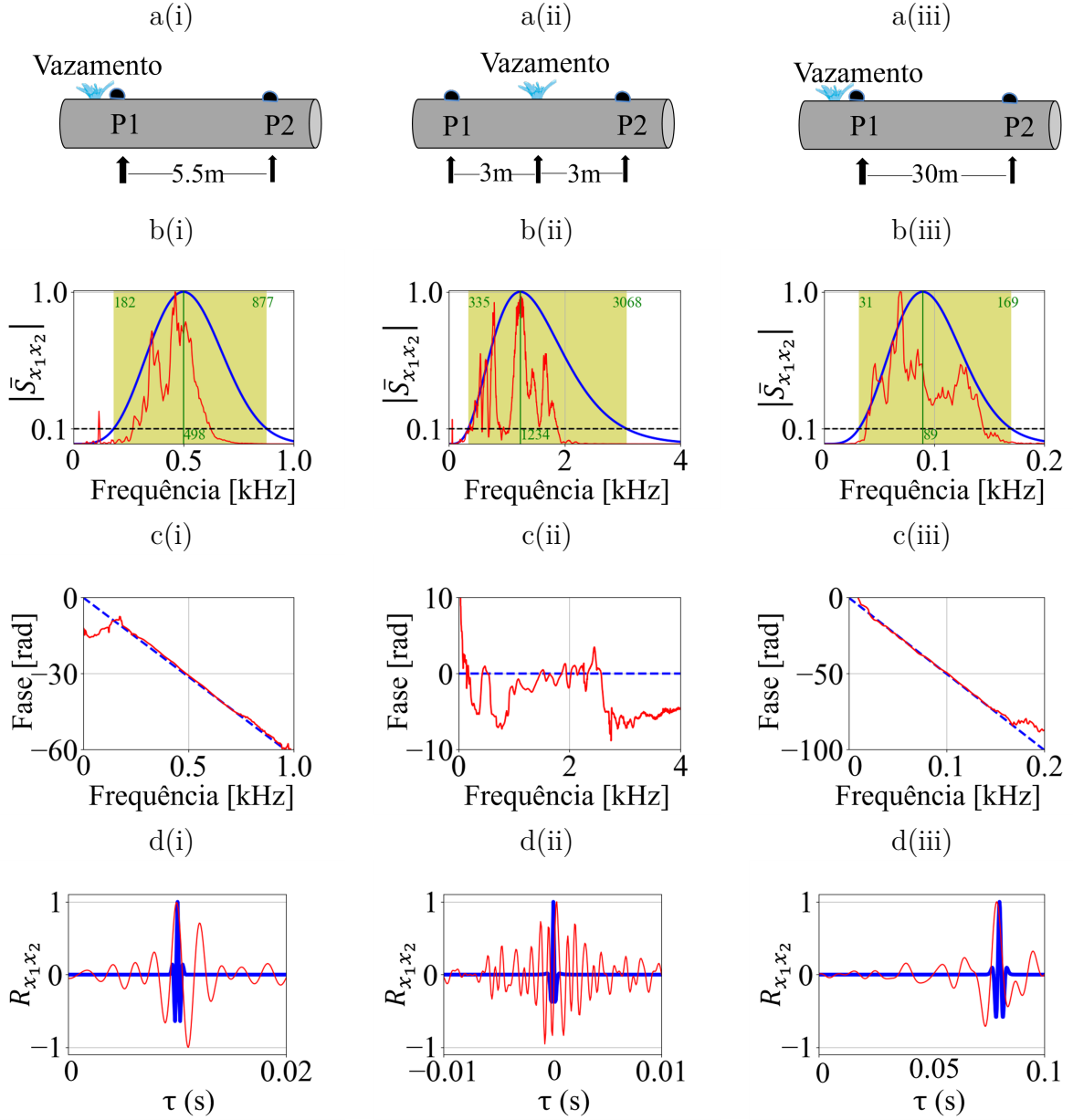


Figura 2.4: Comparação entre o sinal de uma medição real com o de um simulado. (a) Esquema do teste realizado. (b) Densidade espectral cruzada (DEC), calculada a partir dos sinais medidos nas posições 1 e 2. (c) Fase do sinal da DEC. (d) Correlação cruzada calculada a partir dos sinais medidos nas posições 1 e 2 (atraso do sinal). (i) Teste realizado no campo de prova de São Paulo. (ii) Teste realizado no campo de prova de Tupã. (iii) Teste realizado no campo de prova da Inglaterra. (A linha em vermelho corresponde ao sinal real, medido, a linha em azul representa o sinal simulado, enquanto a linha preta pontilhada indica onde $|\bar{S}_{x_1 x_2}| = 0.1$).

2.7 Conclusão

Foi implementado um modelo clássico de propagação de ondas representativo da vibração gerada por problemas de vazamentos em tubos considerando somente a onda do tipo $s=1$, ou seja, a onda caracterizada pelo bom acoplamento fluido-estrutura (*fluid bourne wave*). Portanto, não foi considerado os efeitos de ondas estruturais, por exemplo a $s=2$, as reflexões de ondas que podem estar presentes no sistema e dinâmica estrutural, como por exemplo, ressonâncias. O modelo foi validado utilizando sinais de vazamento reais adquiridos em campos de provas específicos para simulações de vazamento para validações de técnicas vibro-acústicas.

A informação mais importante dessa ferramenta é quanto a banda de frequência efetiva da simulação. Essa banda é calculada teoricamente via modelo de propagação de ondas e pode ser utilizada para auxiliar na gestão do uso de correlacionadores de sinais de ruídos, visto que, quanto menor for essa banda para um problema específico, menor é a probabilidade de se obter uma estimativa confiável do atraso de sinais, portanto, a localização do vazamento também ficaria comprometida. Todas essas informações podem ser acessadas online, pelo operador, o que mostra que o *framework* e a interface em HTML utilizados nesse projeto se mostraram capazes de realizar cálculos complexos em um tempo hábil. Essas informações aliadas a expertise do usuário, são capazes de auxiliar na seleção ou não de correlacionadores de ruídos para uma determinada situação, auxiliando na gestão de perdas como já mencionado.

Capítulo 3

Descrição do campo de prova e medições com haste de escuta

No capítulo anterior foi demonstrado o uso de uma das inúmeras técnicas de detecção de vazamento, a correlação cruzada. Neste capítulo, entretanto, será investigado como a energia de vazamento se propaga ao longo de uma haste, que geralmente é chamada de haste de escuta, sendo este um dos métodos mais simples de detecção de vazamentos. Essa técnica utiliza a vibração da presença do vazamento em tubos que pode ser escutada pelo usuário quando a mesma se propaga ao longo da haste quando em contato com o tubo. Para efetuar esses estudos, se faz necessário realizar simulações de vazamentos em condições controladas de detecção de vazamentos, onde as técnicas de correlação cruzada e haste de escuta podem ser testados. Neste trabalho foi utilizado um campo de prova construído pela SABESP localizado na cidade de Tupã no estado de São Paulo. Nesse campo de prova os ruídos de vazamentos podem ser gerados com condições de contorno controláveis, tornando o processo de aquisição replicável.

Esse capítulo visa descrever o campo de prova, aqui chamado de CPVT (Campo de Prova de Vazamentos de Tupã) mostrando suas principais características construtivas, como o material do tubo e suas dimensões físicas, bem como, as características dos pontos de medidas, instrumentação utilizada e processamento de sinais utilizado para caracterizar o referido campo de prova. Além do mais, pretende-se também mostrar, de forma prática, como os sinais de vazamento se propagam ao longo da haste de escuta

quando a mesma está em contato com o tubo enterrado sob várias condições de contorno, como por exemplo: direção de medida, superfície de contato, posição dos sensores, entre outros.

3.1 Descrição do Campo de Prova de Vazamentos de Tupã (CPVT)

Os experimentos foram conduzidos utilizando um campo de prova, aqui nomeado de CPVT (Campo de Prova de Vazamentos de Tupã), onde diferentes situações de vazamento em um ambiente controlado podem ser simuladas. O campo de prova utilizado pertence à SABESP e fica situado na cidade de Tupã-SP, conforme o próprio nome dado já foi mencionado.

O campo de prova foi projetado em formato de "U", onde o sistema tem suas extremidades conectadas ao sistema de distribuição de água padrão por meio de duas válvulas, aqui chamadas de V_1 e V_2 conforme mostrado na Figura 3.1. O sistema é pressurizado somente após a abertura dessas válvulas e o ar presente na tubulação do campo de prova é expelido abrindo-se uma terceira válvula, chamada aqui de V_3 , para as possíveis bolhas de ar sejam removidas completamente antes de qualquer experimento. Bolhas de ar afetam o acoplamento entre o fluido e o tubo, mecanismo responsável pela propagação do ruído de vazamento.

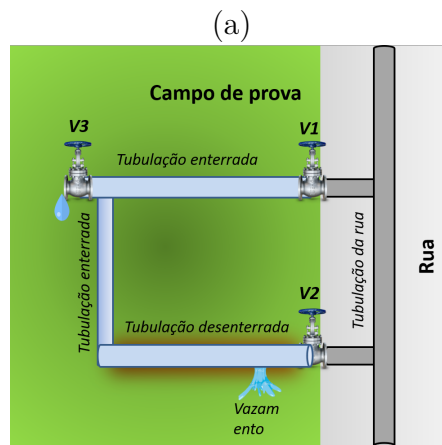


Figura 3.1: Representação esquemática do campo de prova de vazamentos de Tupã (CPVT).

A tubulação é feita de tubo de PVC com diâmetro externo e espessura de parede de 60 mm e 3,3 mm, respectivamente. Esse é o mesmo campo de prova utilizado no caso 2 onde foi investigado o modelo in vácuo da Gao et al (2004). O tubo do tipo PVC é o principal usado no interior do estado de São Paulo para sistemas de distribuição de água residencial. Uma seção do tubo que é conectada a válvula V_2 ainda não está enterrada, pois pretende-se ainda efetuar alguns estudos iniciais de caracterização e escolha de mecanismos de vazamentos que gerem sinais com características próximas às aquelas encontradas em problemas reais. Esta seção do tubo está estendida no solo em uma vala de cerca de 1,5m de profundidade, assim como mostrado na Figura 3.2(a), que é a profundidade padrão para tubos enterrados residenciais. Além do mais, na tubulação existem algumas hastes (tubos) de metal presas com braçadeiras metálicas a mesma. Essas hastes servirão de ponto de acesso para futuras medições na rede quando esta estiver enterrada, conforme também mostrado na Figura 3.2(a). Ressalta-se, entretanto, que estas não são as hastes de escuta mencionado no início do capítulo, que são hastes também metálicas maciças.

É nessa seção do tubo que as medidas são feitas e o vazamento é induzido por um pequeno furo de 1,5 mm de diâmetro, aproximadamente, conforme mostrado na Figura 3.2(b). A diferença entre um tubo enterrado e um tubo “no ar” é o mecanismo pelo qual o ruído de vazamento se propaga ao longo da tubulação. Quando o tubo está envolto ao solo, parte da energia do ruído de vazamento se propaga ao longo do tubo e parte se propaga ao longo do solo, fazendo com que a velocidade e atenuação do sinal de vazamento sejam diferentes daqueles do tubo “no ar” (ALMEIDA *et al.*, 2014).

Portanto, o campo de prova consegue manter variáveis como material e dimensões da tubulação, tamanho do orifício do vazamento e pontos de acessos simultâneos a rede local de distribuição, que poderiam atrapalhar o experimento em uma situação real, constantes, possibilitando uma maior confiabilidade e repetibilidade aos processos. Não se tem, entretanto, um controle fino do ruído de fundo, pois o campo de prova se encontra em uma área residencial.

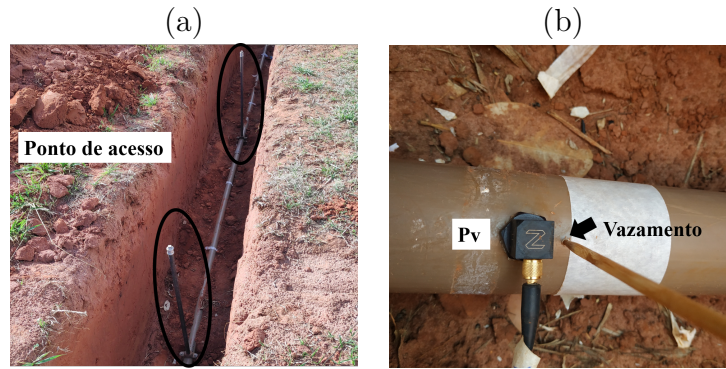


Figura 3.2: (a) Tubulação desenterrada onde o experimento é realizado. (b) Posição do vazamento.

3.2 Descrição dos equipamentos utilizados e a aquisição de sinais

Para realização dos experimentos foram utilizados o sistema de aquisição Siemens LMS Scada XS com 12 canais. Utilizou-se também acelerômetros piezoelétricos tri-axiais da PCB modelo 356A128 e um da Bruel & Kjaer (B&K) modelo 456B003, todos com a sensibilidade de 500 mV/g, foram utilizados para as medições. Os sinais foram adquiridos por 30 segundos a uma taxa de aquisição de 12,8 kHz. Uma haste de escuta instrumentada da Fuji modelo FSB-8D foi utilizada como ferramenta vibro-acústica de análise. Esse equipamento é adequado para trabalhos de detecção de vazamentos em tubos de distribuição de água. Seu funcionamento consiste na detecção de som de vazamento, através do contato da base da haste com a tubulação, verificando nível de severidade exibido em uma tela ao usuário, sendo possível ouvir o ruído captado através de um fone de ouvido, bem como amplificado por um ganho digital. Para a coleta do ruído de vazamento, essa haste conta com um sensor piezoelétrico e um sistema de digitalização de sinais. A parte eletrônica embarcada neste modelo de haste possui um filtro passa banda (100-2000 Hz) para reduzir os ruídos relativos as frequências harmônicas de rede. Ressalta-se que se pretende melhorar o processamento de sinais juntamente com componentes empregados na área de IoT para um melhor processamento de sinais e análise dos dados, provenientes de tais dispositivos. Isso será discutido no capítulo posterior, entretanto, para que isso seja possível, precisa-se caracterizar o

dispositivo.

3.3 Descrição dos testes e processamento de sinais para a caracterização da haste de Escuta

Diferentes testes foram feitos para caracterizar a haste de escuta, mencionada na seção anterior, fazendo medidas ao longo de sua estrutura metálica (barra). Em todos os testes, duas aquisições de dados foram realizadas. Uma com o sistema sem a presença do vazamento, a fim de obter o ruído de fundo do ambiente (*background noise*), e outra com a simulação do vazamento (presença de um vazamento simulado). Os seguintes testes foram realizados e serão descritos nas seções seguintes:

- Teste 1 (seção 3.4): verificar a influência do usuário nas medições realizadas utilizando a haste de escuta. Nesse teste a haste é sustentada por elásticos evitando a interferência externa do usuário, bem como, medições são feitas removendo os elásticos e a haste segura pelo usuário. Esses testes são mostrados na Figura 3.3a(ii) e 3.3b(ii) para a haste suportada por elásticos e a mesma sendo segura pelo usuário, respectivamente;
- Teste 2 (seção 3.4): verificar a influência do tipo de ponta da haste (rigidez de contato). A haste testada possui dois tipos distintos de pontas. Uma ponta fina, que é mostrada na Figura 3.3a(iii) e uma ponta mais “achatada”, que é mostrada na Figura 3.3b(iii). O sensor da haste é utilizada aqui, no teste 2. Observa-se também um sensor relacionado com o teste seguinte (teste 3);
- Teste 3 (seção 3.5): verificar a influência dos pontos de medição e a direção das medidas. O teste é feito ao lado do vazamento (P_v), onde a vibração da haste é medida na sua base (P_b), no topo (P_t) e na sua extremidade (P_e), conforme mostrado no esquema da Figura 3.3a(i), bem como, um sensor é colocado ao lado do vazamento (fonte de excitação) para obter a energia vibratória de entrada no

sistema (tubo). Uma foto ressaltando a base da haste de escuta instrumentada (P_b) e do ponto de medição do tubo ao lado do vazamento (P_v) é mostrado na Figura 3.3b(i);

- Teste 4 (seção 3.6): verificar a influência do tipo de superfície onde a haste é colocada para efetuar as medidas, que também é relacionada a rigidez de contato. Esse teste foi realizado com um outro mecanismo de vazamento. Esse mecanismo consiste em uma adaptação de uma válvula 90 graus na extremidade de uma mangueira conectada ao orifício do vazamento, tendo como objetivo um maior controle de sua vazão, conforme mostrado na Figura 3.4(a)(ii). As aquisições realizadas com o sensor na haste foram medias diretamente no tubo e em cima de um colar metálico a 1m do vazamento, conforme apresentado na Figura 3.4b(ii). Além das aquisições realizadas com a haste (P_h), foram utilizados mais três sensores em três posições distintas: um fixo ao lado do vazamento P_v , um na tubulação P_t e outro no colar P_c , para cada ponto de medição, conforme mostrado na Figura 3.4b(i).
- Teste 5 (seção 3.7): verificar a sensibilidade da haste para diferentes distâncias do vazamento. Esse teste foi realizado com o mesmo mecanismo de vazamento utilizado no teste anterior utilizando o próprio sensor da haste instrumentada. Tendo em vista a interferência que a rigidez de contato exerce na aquisição do sinal, o ruído de fundo foi adquirido com a haste suspensa, sem está em contato em nenhuma superfície, afim de se obter somente o seu ruído de instrumentação. As aquisições das simulações foram feitas para as distâncias 0m, 1m, 2m, 3m, 6m e 13m do vazamento.

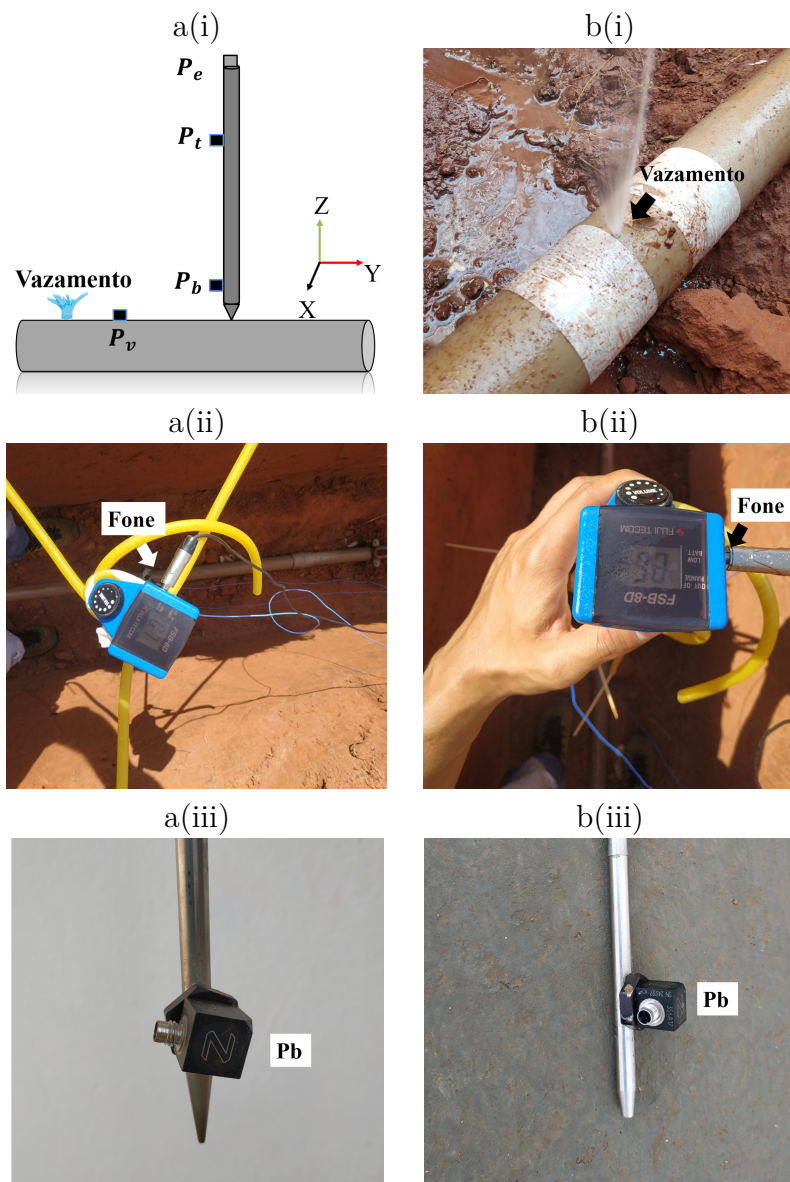


Figura 3.3: a(i) Esquema da disposição dos sensores e referência global. b(i) Vazamento. a(ii) Haste metálica presa por elásticos. b(ii) Haste metálica segura pelo operador. a(iii) Ponta de contato fina. b(iii) Ponta de contato chata.

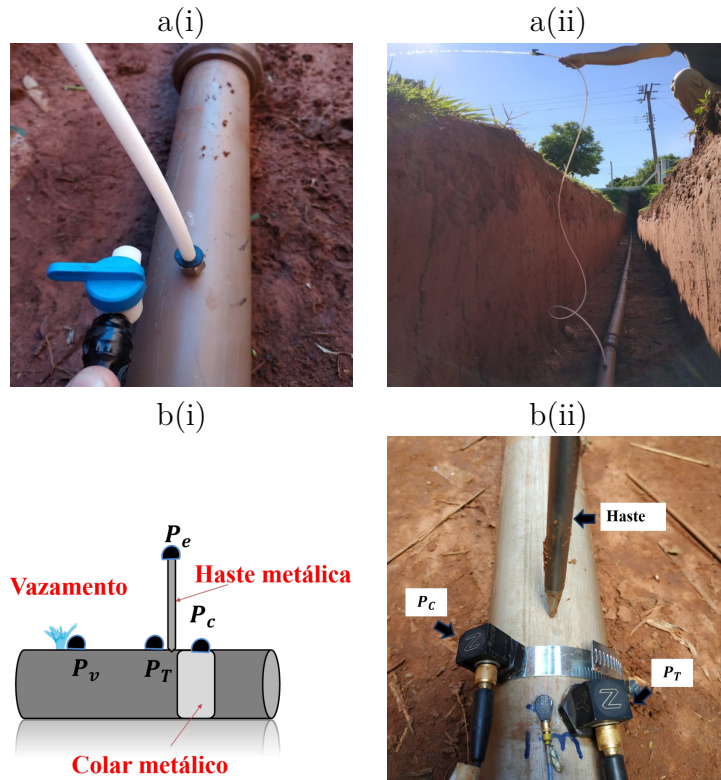


Figura 3.4: Campanha de testes com novo mecanismo de vazamentos (a) Mecanismo de vazamento com válvula. a(i) Mecanismo completo sem vazamento. a(ii) Mecanismo completo com o vazamento. (b) Posições do teste. b(i) Esquema das posições em que foram realizadas as medições com a haste no tubo. b(ii) Aquisição no ponto.

Alguns desses testes serão mostrados em conjunto nas seções futuras para facilitar o entendimento do problema e evitar excessos de figuras, como por exemplo, os testes 1 e 2 serão mostrados em conjunto na seção seguinte, ou seja, na seção 3.4. O teste 3 será apresentado na seção 3.5, e os testes 4 e 5 serão mostrados na seção 3.6 e 3.7, respectivamente. Vale ressaltar que para os testes a haste foi posicionada perpendicular ao tubo e os sensores foram protegidos utilizando sacos plásticos para evitar que a água do vazamento molhasse o equipamento, reduzindo as chances de danos. Portanto, o vazamento é a fonte de excitação utilizada e sua energia vibratória que é transmitida para a haste é alvo de análise nesse capítulo.

Nota-se na Figura 3.3a(i) sensores com diferentes colorações, sendo o de cor escura os PCB e o de cor metálica/clara, sensor B&K, localizado na extremidade da haste. Apesar de serem de diferentes marcas, o sinal obtido pelos sensores não apresenta dife-

renças significativas, já que ambos possuem a mesma sensibilidade. A diferença entre as medidas no topo e na extremidade é que para a primeira medida o sensor se encontra na superfície da haste, assim como a medida da base, enquanto que, para a medida da extremidade, a base do sensor é colada paralelamente a seção transversal da haste, sendo que seu eixo de simetria coincida com um dos eixos de medição do sensor. Portanto, o ponto de medição P_e possui direção similar ao sensor da instrumentação da haste. Os pontos de medida P_v e P_b são enfatizados na Figura 3.3a(i).

Para a caracterização da haste, serão utilizadas algumas ferramentas de processamento de sinais clássicos como a Auto Densidade Espectral (PSD – *Power Spectral Density*) e a Coerência. A PSD é utilizada quando existe um sinal único para análise, sem comparação com qualquer outra medida. Além do mais, auto densidade espectral é uma série temporal que descreve a distribuição de energia em componentes de frequência que compõem esse sinal, podendo ser calculada como sendo a transformada de Fourier da função de autocorrelação $R_{x_1x_1}(\tau)$, Eq.3.1.

$$S_{x_1x_1}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{x_1x_1}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (3.1)$$

Essa análise pode ser fornecida pelo método de Welch, que é calculado de maneira simplificada (caso sem sobreposição) como demonstrado por Shin e Hammond (2008). O PSD é calculado definindo o tempo de truncamento igual a 1 segundo, com sobreposição de 50%, dando uma resolução de frequência de 1 Hz. O enjanelamento utilizado no método foi o Hanning, que possui uma forma similar ao meio ciclo de uma onda cossenoidal, bastante útil para a análise de sinais transientes maiores que o tempo de duração da janela.

A coerência é uma função que calcula a covariância da potência espectral, dentro de bandas de frequência específicas, logo essa função é capaz de identificar o grau de associação linear entre dois sinais (por exemplo, entrada e sinais de saída). A função de

coerência entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$ é definida na Eq.3.2.

$$\gamma_{x_1x_2}^2(f) = \frac{|S_{x_1x_2}(f)|^2}{S_{x_1x_1}(f)S_{x_2x_2}(f)} \quad (3.2)$$

onde, $S_{x_1x_1}$ e $S_{x_2x_2}$ são a auto densidade espectral (PSD) do sinais x_1 e x_2 , $S_{x_1x_2}$ é a auto densidade espectral cruzada (CSD) desses sinais. A coerência é utilizada para verificar como a energia do vazamento ao longo do tubo é afetada quando a mesma se propaga ao longo da haste. Para a coerência será utilizado sempre o sinal medido ao lado do vazamento (P_v), como referência, e o outro sinal de análise sempre será um sinal da haste de escuta (base, topo ou extremidade). Cada caso será devidamente explorado nas seções seguintes.

3.4 Influência do manuseio do usuário e tipo de ponta utilizada na aquisição do sinal com a haste de escuta

Um dos objetivos desse trabalho é estudar o comportamento do sinal adquirido com haste de escuta e utilizar ferramentas do chamado internet das coisas (IoT – *Internet of Things*) para melhorar a identificação e localização de vazamentos em tubos enterrados. Entretanto, para verificar se essas técnicas sofrem interferência com a forma de manuseio do usuário, foram realizados alguns testes. Para isso foram efetuadas medidas onde elásticos conectados ao suporte da haste serviram para manter a mesma suspensa sem a interferência com o usuário, conforme mostrado na Figura 3.3a(ii). Medidas onde o usuário segura a haste também foram realizadas, conforme mostrado na Figura 3.3b(ii) foram feitas. Foram utilizados plásticos para proteger os sensores de respingos de água proveniente do vazamento próximo a haste de escuta.

Para esse caso estudo será utilizado um sensor ao lado do vazamento (P_v), e o sensor da própria haste de escuta, ou seja, aquele que possui saída de áudio para que o usuário “ausculta” o ruído do vazamento proveniente da tubulação. A medição na posição do vazamento foi realizada para não haver dúvidas da influência de uma possível

variação devido a flutuação da pressão ou ruído externo, ou seja, a entrada (excitação) do sistema é a mesma. Entretanto, o sensor da haste foi escolhido, pois é onde a haste é manuseada pelo usuário, logo o ponto de medida mais sensível para o caso a ser analisado. O sinal de saída tanto do sensor quanto da haste instrumentada é dada em volts, sendo que aquele da haste pode ser amplificado (ganho) via um potenciômetro (volume) instalado na mesma. Como mencionado anteriormente, a PSD será utilizada para auxiliar na caracterização da haste de escuta. A PSD do vazamento para os testes da haste com e sem elástico (haste segura pelo usuário) é mostrado na Figura 3.5(a) e 3.5(b), respectivamente. A PSD é dada em dB tendo como referência a unidade arbitrária de 1 Volt. Observa-se que o espectro do vazamento é muito similar para os dois testes realizados.

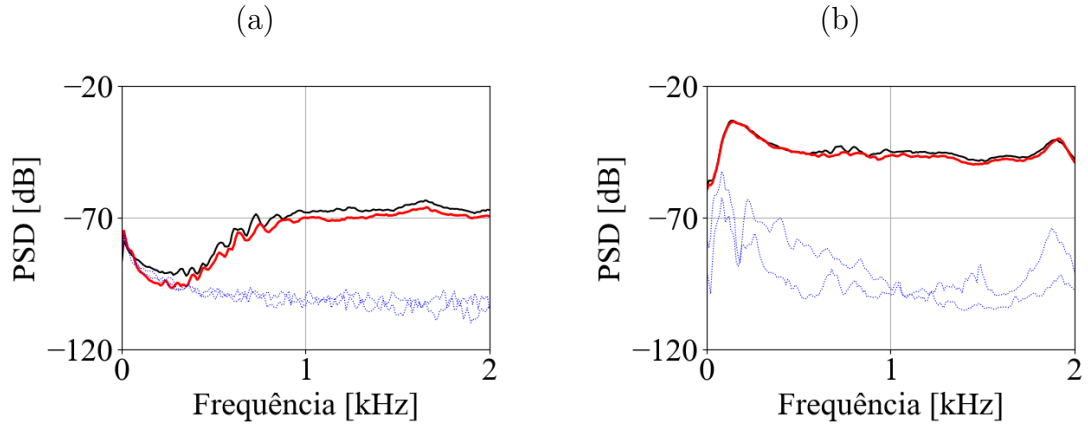


Figura 3.5: Comparação entre os procedimentos de aquisição. (a) PSD do sinal adquirido no tubo (P_v). (b) PSD do sinal adquirido do sensor da haste (fone). (A linha vermelha corresponde a haste presa por elásticos; linha preta a segura pelo operador).

Os espectros foram medidos para cada medição feita simultaneamente, visando demonstrar que a característica espectral do mesmo não varia, e se houver variação na haste não é devido a variação espectral do vazamento e sim do sistema mecânico. A linha vermelha e a preta estão relacionadas com o vazamento medido para os casos com elástico e sem o mesmo (haste segura pelo usuário), respectivamente, e as linhas azuis tracejadas são relacionadas ao ruído de fundo. É possível observar uma diferença na

amplitude dos sinais da saída da haste quando comparada com o resultado do sensor no ponto P_v . Isso pode ser devido ao ganho aplicado, bem como, a curva de calibração do sensor da haste. O ponto a ser ressaltado é que o espectro da haste possui um comportamento linear acima de 200 Hz, aproximadamente, enfatizando a presença do vazamento, bem como, uma expressiva diferença entre o ruído de fundo e o ruído de vazamento, ou seja um bom SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). Observa-se também que a PSD não se altera com a interferência do usuário (mãos na haste), mantendo suas características independente do tipo de suporte.

Para verificar a condição de contorno de contato (ponta da haste), utilizou-se um *set-up* similar daquele feito para o caso de análise da interferência do usuário, descrito anteriormente. Entretanto, para a análise dos sinais obtidos com os diferentes tipos de ponta (haste), utilizou-se o ponto P_e na direção axial com o sensor PCB montando na própria haste (direção z). O ruído de vazamento no ponto P_v também foi medido para demonstrar que a energia do vazamento é similar para as duas medidas realizadas e não possui significativa mudança. A Figura 3.6(a) mostra a PSD do ruído de vazamento das duas medições realizadas na tubulação. As linhas vermelha e preta são relativas aos sinais obtidos para a situação com a haste com a ponta fina e ponta chata, respectivamente, e a linha fina azul pontilhada corresponde ao ruído de fundo para essas medidas. Nota-se que ambos os sinais de vazamento e ruído de fundo possuem características espectrais próximas. A Figura 3.6(b) mostra os sinais obtidos na base da haste. É possível observar que a ponta fina é melhor indicada para aquisições para a faixa de frequência até 1.5 kHz e a ponta chata para faixas superiores a essa.

Geralmente, a ponta fina é utilizada no uso da detecção de vazamentos quando a haste está em contato diretamente com o tubo ou em superfícies planas. A haste chata, é mais utilizada para medição em quinas ou pontos de medidas com característica "pontiaguda". Portanto, para a caracterização da haste levando em conta a orientação da medição, será utilizado a haste com a ponta fina.

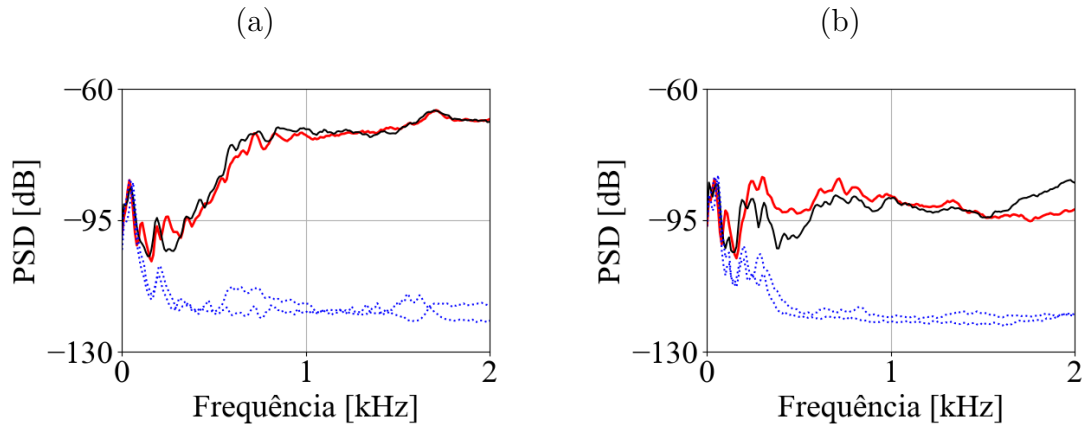


Figura 3.6: Comparação entre os tipos de ponta utilizados. (a) PSD do sinal adquirido no tubo. (b) PSD do sinal obtido com a ponta chata e fina no ponto $P_e(z)$. (A linha vermelha corresponde a ponta fina; linha preta a ponta chata).

3.5 Influência da escolha dos pontos de medida, direção da medição

Nessa seção serão analisadas o comportamento vibratório da haste considerando três diferentes direções de medição utilizando o sensor triaxial PCB, bem como, três diferentes pontos de medida. As direções adotadas, conforme já descrito na Figura 3.3a(i), são: axial a haste (z), perpendicular a haste (x) e radial a haste (y). As Figuras 3.7(a), 3.7(b), 3.7(c) e 3.7(d) mostram as PSDs para as diferentes direções (x, y, z), conforme já descrito na Figura 3.3a(i) para os pontos de medida P_v , P_b , P_t e P_e , respectivamente. As linhas nas cores preta, vermelha e verde pontilhada, correspondem aos sinais medidos nas direções x , y , z , respectivamente. O ruído de fundo também é mostrado na figura na linha pontilhada azul.

Observa-se na Figura 3.7(a) que para o ponto P_v todas as direções apresentam densidades espectrais similares. Entretanto, a direção x contém um melhor SNR para frequências baixas entre 200 e 500Hz. A Figura 3.7(b) mostra que a energia do vazamento no tubo (P_v) sofre uma atenuação quando transmitida para haste, como visto no ponto P_b , possivelmente devido a mudança de material, superfície e direção da propagação do ruído de vazamento. Porém, a quantidade de energia transmitida ao longo da

haste, do ponto P_b ao ponto P_t , se mantém muito próxima, ou seja, não há perdas de informações ou atenuação significativa no sinal nesse percurso. Esse é mesmo o resultado observado para o sensor na extremidade (P_e), que apresenta praticamente a mesma faixa de energia independente das direções, como mostra a Figura 3.7(d).

Para um melhor entendimento de qual direção e ponto de medição são vantajosos para adquirir o ruído de vazamento, utiliza-se a coerência entre o ponto de medição ao lado do vazamento P_v como referência e os sinais obtidos em P_b , P_t e P_e . A Figura 3.8 ilustra esse caso. A legenda “a”, “b” e “c” estão relacionadas com as coerências calculadas nas direções x, y e z, respectivamente, entre o ponto de medida P_v e os sinais dos pontos obtidos em P_b , P_t e P_e dados pelas legendas “i”, “ii” e “iii”, respectivamente. Nota-se que mesmo sendo o ponto mais distante do contato entre a haste e a superfície do vazamento, o ponto P_e é o melhor ponto para se fazer a aquisição, pois possui a melhor coerência ao longo de uma larga banda de frequência, que é mostrada na Figura 3.8c(iii). Logo a configuração onde o sinal radial do ponto P_v se propaga perpendicularmente a haste, ou seja, axial a esta, é a que apresenta a melhor coerência entre o sinal de entrada e saída do sinal adquirido.

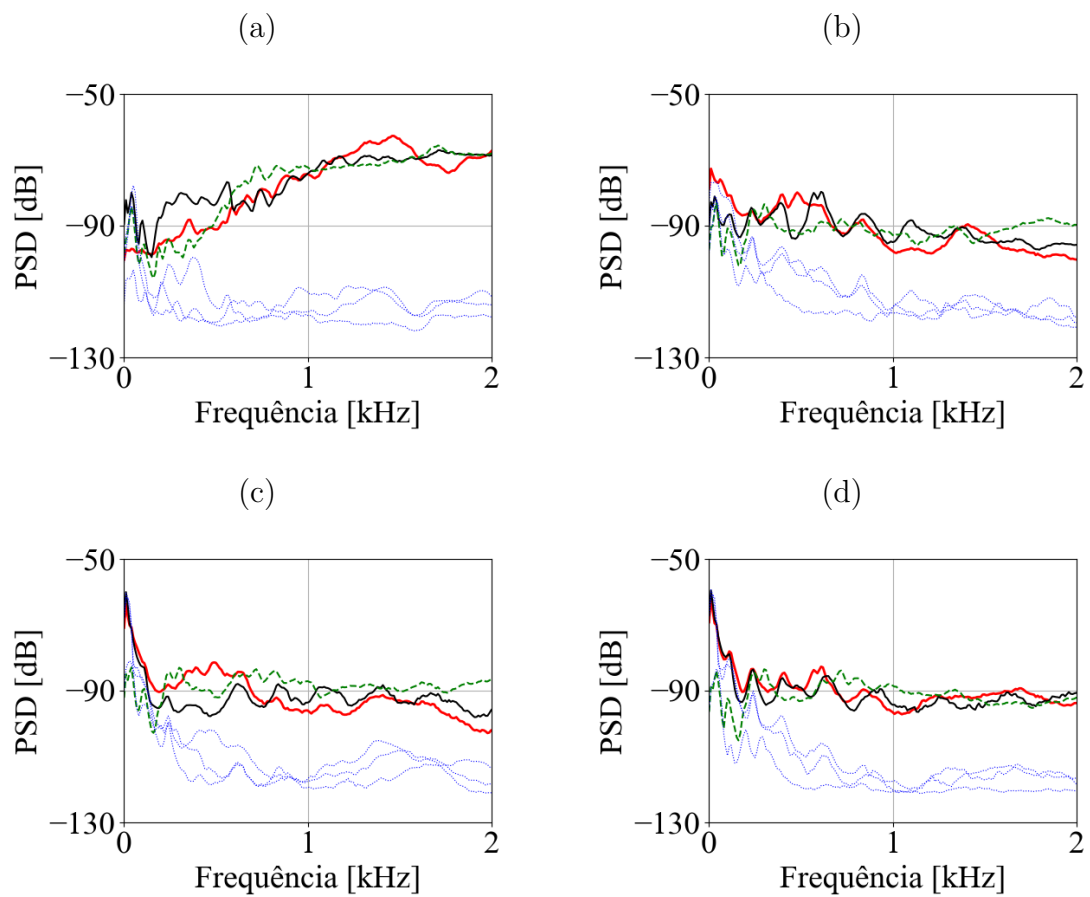


Figura 3.7: PSD do sinal obtido dos sensores nos pontos P_v , P_b , P_t e P_e , nas direções (x,y,z). (a) No ponto P_v . (b) No ponto P_b . (c) No ponto P_t . (d) No ponto P_e . (A linha preta corresponde ao eixo x; linha vermelha ao eixo y; linha verde tracejada ao eixo z).

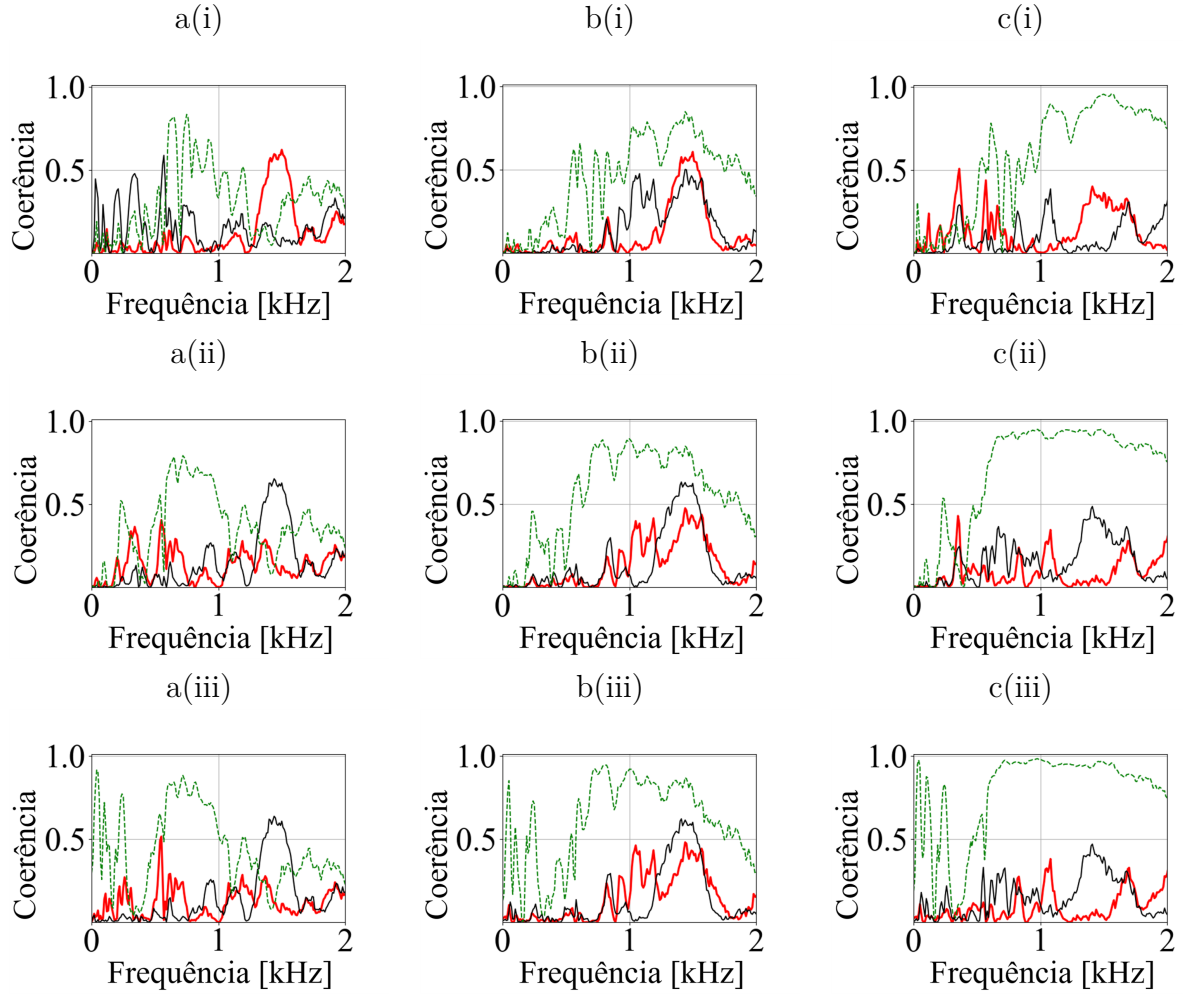


Figura 3.8: Coerência do sinal obtido do sensor P_v em relação aos sensores P_b , P_t e P_e , nas direções (x,y,z). (a) Sinal de entrada $P_v(x)$. (b) Sinal de entrada $P_v(y)$. (c) Sinal de entrada $P_v(z)$. (i) Sinal de saída $P_b(x,y,z)$. (ii) Sinal de saída $P_t(x,y,z)$. (iii) Sinal de saída $P_e(x,y,z)$. (A linha preta corresponde ao eixo x do ponto em análise; linha vermelha ao eixo y; linha verde tracejada ao eixo z).

A Figura 3.9(a) compara a coerência entre o sinal de entrada (ruído de vazamento na direção radial somente) e a saída da haste via sensor no ponto P_e , bem como utilizando sua saída de áudio (haste instrumentada). A coerência entre P_v e P_e com os sinais na direção x é mostrado via linha preta sólida enquanto a coerência entre o sinal P_v na direção x e o sensor da haste instrumentada (fone) é mostrado via linha vermelha. A PSD dos sinais obtidos do ponto P_e e fone podem ser observados na Figura 3.9(b). Observa-se que o ponto P_e possui uma coerência maior do que aquela utilizando o próprio sensor da haste (adquirido na saída de áudio). Mesmo que o ponto P_e (linha preta), seja o que apresenta uma maior coerência entre os sinais entrada/saída, o mesmo não acontece para o PSD, quando comparado com o sensor da haste, como mostrado na Figura 3.9(b). Talvez esse sensor seja diferente construtivamente e um ganho seja adicionado.

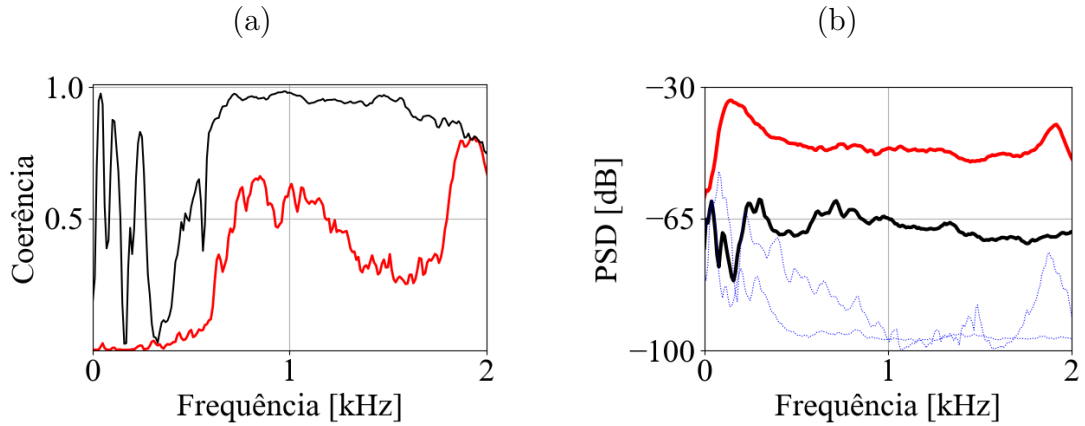


Figura 3.9: Coerência do sinal obtido da haste com o próprio sensor e com o sensor externo. (a) Coerência entre os sinais obtidos do ponto P_v em relação aos pontos $P_e(z)$ e o fone (haste instrumentada completa). (b) PSD dos sinais obtidos do ponto $P_v(z)$ e Fone. (A linha em cor preta representa o sinal do ponto $P_e(z)$ enquanto a linha em cor vermelha o sinal do fone).

3.6 Efeito da superfície de contato na medição via haste de escuta

Na seção 3.4 foi analisado a influência do tipo de ponta da haste na resposta da mesma quando utilizada na medição de ruído de vazamento. Nesta seção, entretanto, será investigado como a superfície a qual a haste é colocada. Para esse estudo a haste é colocada diretamente no tubo (caso 1) e também em um colar metálico ao redor do tubo (caso 2) conforme já mostrado na Figura 3.4b(ii). A análise dos casos será feita com base na função de transferência (FRF – *Frequency Response Function*) do sinal no ponto de vazamento P_v (entrada) e um ponto de medida, que no caso é a ponta da haste P_e (saída). A função transferência é a representação matemática da relação entre a entrada e a saída de um sistema físico no domínio da frequência, ou seja, ela evidencia as características físicas do sistema mecânico auxiliando no entendimento de sistemas lineares, onde a FRF não se altera independentemente do tipo de entrada utilizada. Dessa maneira, pode-se encontrar o sinal de saída de um sistema mecânico linear, que para o caso analisado é a haste de escuta, conhecendo a excitação de entrada, que no caso seria o ruído de vazamento. Portanto, o sinal de saída da haste é dado por

$$X_n(\omega) = L(\omega) * H_{tubo}(\omega) * H_{hn}(\omega) \quad (3.3)$$

onde $L(\omega)$ corresponde ao espectro do sinal do vazamento (sinal no domínio da frequência), $H_{tubo}(\omega)$ a função de resposta em frequência do tubo (FRF entre P_v e P_T), $H_{hn}(\omega)$ que refere-se a FRF da haste utilizando os sinais dos sensores P_T e P_e para os casos 1 ($n=1$) e P_c e P_e para os casos 2 ($n=2$), onde $H_{h1}(\omega)$ é a FRF da haste quando colocada diretamente no tubo (tubo-haste), e $H_{h2}(\omega)$ é a FRF da haste quando colocada no colar metálico ao redor do tubo (tubo-colar metálico-haste).

Para mostrar que o sinal do tubo é estacionário e possui as mesmas características espectrais para os dois casos de medida, calcula-se a PSD para o caso 1 (linha cor preta

sólida) e para o caso 2 (linha cor azul) que são mostrados na Figura 3.10(a). Nota-se que a característica espectral do vazamento não se altera para as medidas realizadas nos dois casos, ou seja, se houver alteração no espectro do sinal medido na haste (P_e) se dá por outros fatores não relacionados à excitação de entrada (vazamento). A PSD do sinal medido na ponta da haste (P_e) para o caso 1 (linha preta) e caso 2 (linha azul) são mostradas na Figura 3.10(b), respectivamente. Nota-se que existe uma diferença de amplitude entre as PSDs, especialmente ao redor da frequência de 1kHz.

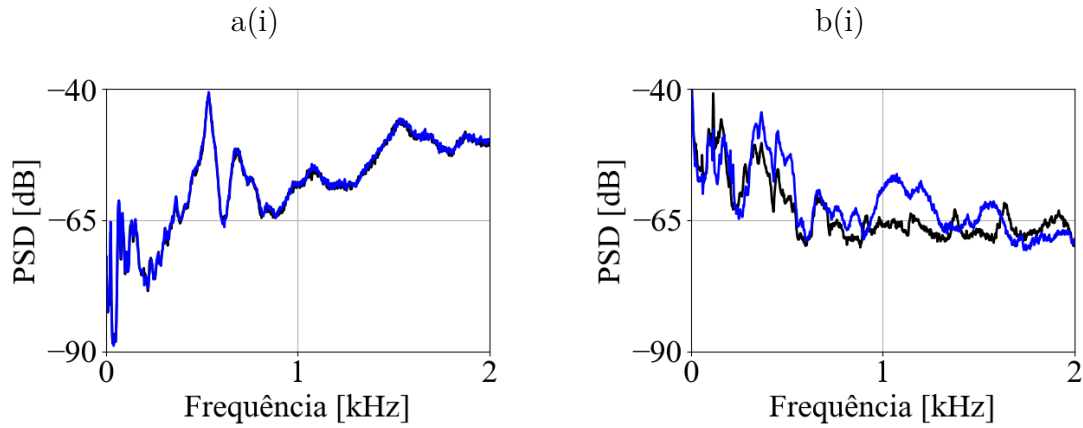


Figura 3.10: PSD do sinal adquirido para os casos 1 e 2. (a) Análise do ponto P_v . (b) Análise do ponto P_e . (As linhas em cor preta correspondem aos resultados das medições com a haste na tubulação (caso 1) e em azul as medições adquiridas com a haste no colar (caso 2)).

Para entender melhor esse comportamento (diferença) utiliza-se a coerência e função de resposta em frequência. Elas são mostradas nas Figuras 3.11(a) e 3.11(b), respectivamente. A legenda “i” e “ii” se refere a resposta em frequência $H_{tubo}(\omega)$ e $H_{hn}(\omega)$ para medidas feitas no caso 1 e 2, respectivamente. O padrão de cores foi mantido conforme figura anterior para facilitar a interpretação. Nota-se que a FRF do tubo não possui mudança substancial. Entretanto a FRF da haste $H_{h1}(\omega)$ e $H_{h2}(\omega)$ mostradas na Figura 3.11(b) diferem em amplitude em frequências acima de 1kHz. Isso pode ser devido a melhora no acoplamento tubo-colar metálico-haste diminuindo as perdas em altas frequências com o aumento da rigidez de superfície. A coerência para $H_{tubo}(\omega)$ é mostrada na Figura 3.11a(ii), e a coerência para $H_{h1}(\omega)$ e $H_{h2}(\omega)$ são mostradas na Fi-

gura 3.11b(ii). Nota-se, mais uma vez, que a coerência da FRF do tubo é próxima entre elas, reforçando seu comportamento linear e excitação do tipo quasi-estacionário. Por outro lado, para as FRFs das hastes, tem-se uma diminuição das mesmas quando comparadas com coerência do $H_{tubo}(\omega)$ indicando uma diminuição da correlação do sinal que se propaga no tubo e aquele que vai para a haste. Entretanto, ressalta-se uma melhor coerência para $H_{h2}(\omega)$ em torno de 1kHz que coincide com a região da PSD e $|H_{h2}(\omega)|$ sendo um possível indicativo da melhora na transmissão da energia do vazamento nessa faixa de frequência.

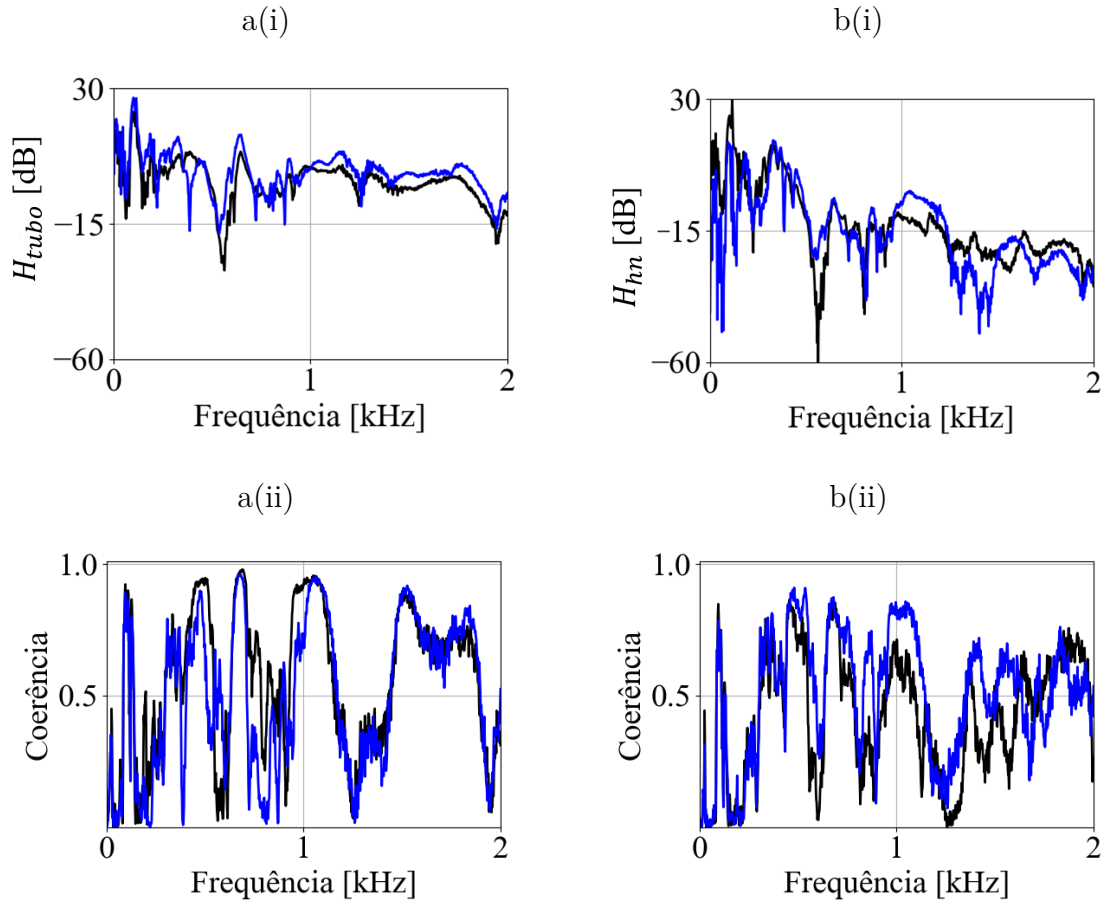


Figura 3.11: (a) Resultado da função de resposta em frequência para os casos 1 e 2. (b) Resultado da Coerência entre os pontos para os casos 1 e 2. (i) Resposta em frequência H_{tubo} . (ii) Resposta em frequência H_{hn} . (As linhas em cor preta correspondem aos resultados das medições com a haste na tubulação e em azul as medições adquiridas com a haste no colar).

3.7 Sensibilidade da haste instrumentada para diferentes distâncias

Para esse estudo utilizou-se medições do ruído de vazamento via haste de escuta ao lado do vazamento e medições onde a haste foi colocada a 1m, 2m, 3m, 6m e 13m do vazamento. As PSDs do sinal de vazamento medido via acelerômetro localizado no ponto P_e da haste para as posições “vazamento”, 1m, 2m, 3m, 6m e 13 m são mostradas nas Figuras 3.12(a), 3.12(b), 3.12(c), 3.12(d), 3.12(e) e 3.12(f), respectivamente. O ruído de fundo/instrumentação (linha azul tracejada) e o ruído de vazamento (linha preta sólida) são mostrados para evidenciar a energia do sinal do vazamento medido, o seja, consegue-se medi-lo quando o mesmo se encontra acima do ruído de fundo/instrumentação. Nesse teste foi possível observar nas 3.12(a) a 3.12(e), a presença da energia de vazamento para distâncias de até 6m do vazamento. Entretanto, para a distância de 13m cuja PSD é mostrada na Figura 3.12(f), não foi possível diferenciar a energia proveniente do vazamento daquela proveniente do ruído de instrumentação do equipamento. Essa característica se deve a atenuação dos sinais de vazamento quando os mesmos se propagam ao longo do tubo, especialmente por ser um tubo de PVC. Portanto, quanto maior a distância em que a medição é realizada do local do vazamento, mais difícil se torna a percepção de qualquer tipo de energia a não ser a do próprio ruído de instrumentação do equipamento, já que os sinais vibro-acústicos adquiridos na tubulação são facilmente corrompidos com ruídos espúrios que contaminam a medição.

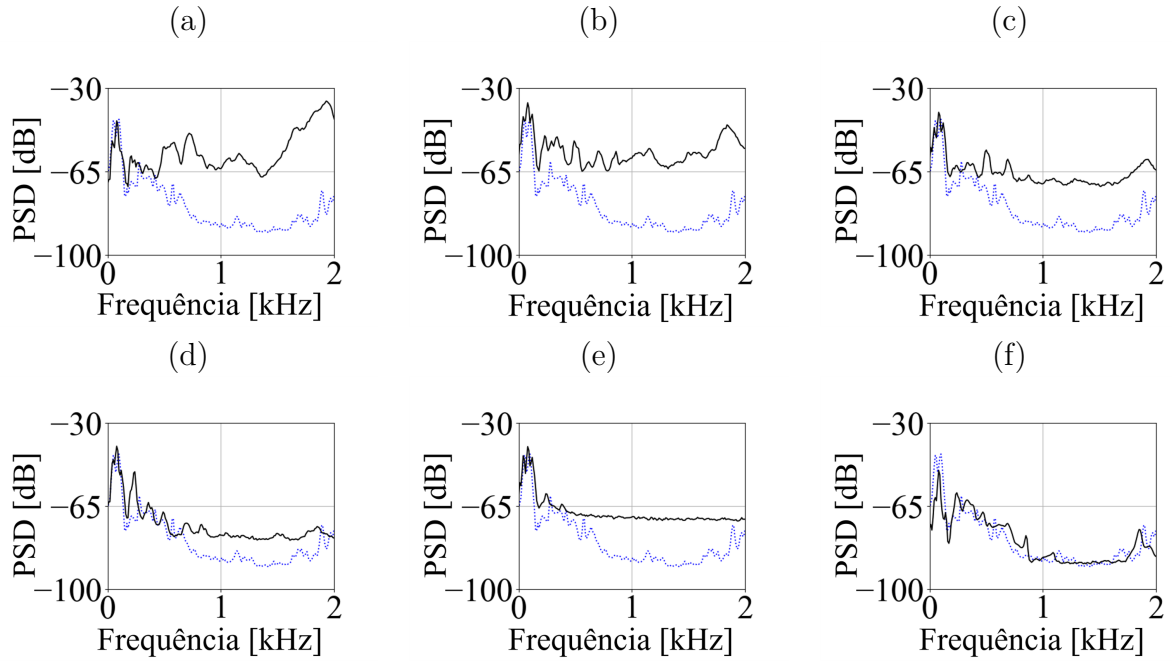


Figura 3.12: Verificação da sensibilidade da haste instrumentada. (a) Aquisição realizada ao lado do vazamento. (b) Aquisição realizada a 1m do vazamento. (c) Aquisição realizada a 2m do vazamento. (d) Aquisição realizada a 3m do vazamento. (e) Aquisição realizada a 6m do vazamento. (f) Aquisição realizada a 13m do vazamento. Onde a linha preenchida corresponde ao sinal do vazamento e a linha pontilhada ao sinal do ruído de instrumentação do equipamento.

3.8 Conclusão

A haste de escuta instrumentada mostrou-se capaz de identificar a presença de um vazamento até uma distância de 6m do mesmo, independentemente do tipo de ponta utilizado, para distâncias superiores a essas não foi possível diferenciar a energia proveniente do vazamento da energia do ruído de instrumentação do equipamento.

Para os casos analisados da interferência da rigidez de contato do sistema (haste/superfície medida), a medição realizada no colar metálico apresentou uma leve melhora da densidade de energia e coerência para valores de frequência acima de 1 kHz, quando comparada com a medição realizada diretamente na tubulação. Com relação as pontas utilizadas, constatou-se que a ponta fina apresenta um comportamento melhor para a faixa de frequência de 0 a 1.5 kHz, enquanto a chata, se mostrou mais eficaz para faixas superiores a essa.

Analisando o comportamento vibratório da haste, observou-se que a direção que se mostrou mais eficaz, apresentando uma maior coerência entre os sinais de entrada/saída, é a direção de propagação axial ao seu corpo, ou seja, radial a tubulação (eixo z). Dessa forma, a melhor configuração de posição/eixos para a aquisição é no ponto P_e na direção z (axial a haste), justamente por se tratar da posição e eixo que apresentam a melhor coerência com o ponto do vazamento (P_v).

Capítulo 4

Conceitos de Internet das Coisas Aplicados a Haste de Escuta

Como mencionado em capítulos anteriores, um dos dispositivos mais utilizados na detecção de vazamentos em tubos de distribuição de água enterrados é a haste de escuta. Essa haste de escuta pode ser analógica ou digital (também chamada de instrumentada). A primeira possui uma câmara acústica em uma de suas extremidades que amplifica de maneira “analógica” o sinal de vazamento que se propaga ao longo da haste quando esta é colocada em contato com o tubo. O segundo tipo de haste mencionado possui um sensor integrado a um circuito digital, cujo ganho (volume) é do tipo digital, além de possibilitar o uso de fones de ouvido para escutar o ruído de vazamento medido e estimar sua severidade que pode ser mostrada em uma tela LCD melhorando assim a procura pelo vazamento. Entretanto, não existe nenhuma análise no domínio na frequência, seleção da banda de filtros, localização da medição via GPS (*Global Positioning System*) e gravação do sinal coletado pelos sensores.

Dessa maneira, é possível obter essas melhorias utilizando conceitos da área chamada de Internet das Coisas, que geralmente é chamada de IoT (do inglês *Internet of Things*) que possui como características marcantes o custo relativamente baixo e resultados obtidos geralmente compatíveis com sua aplicação. Portanto, o objetivo desse capítulo é mostrar que é possível obter ferramentas adicionais utilizando de processamento de sinais clássicos dos sinais coletados via haste de escuta clássica utilizando como base

dispositivos IoT juntamente com processamento via software livre *Python* e *smartphones* para visualização dos sinais processados, tornando a investigação mais precisa e intuitiva.

Portanto, esse capítulo tem como objetivo verificar se a resposta das aquisições obtidas via microprocessador *Raspberry Pi*, comumente utilizada na área de IoT, apresenta características similares dos sinais obtidos por um sistema de aquisição comercial já consolidado no mercado. Um *software* conceitual também será desenvolvido visando uma melhorar a identificação do vazamento em tubos.

4.1 Caracterização do sistema de medição via Raspberry pi

Os experimentos foram conduzidos no CPVT, conforme mencionado no Capítulo 3. Os sinais adquiridos no experimento foram obtidos na saída de áudio da haste instrumentada completa, utilizando o sistema de aquisição Siemens LMS Scada XS (sistema comercial consolidado) e posteriormente usando um *Raspberry Pi 3B*. Como o *Raspberry* não possui entrada de áudio, foi adicionada a uma de suas entradas USB uma placa externa de áudio da Ugreen com conexão USB modelo Hifi adaptador áudio Pc Mac Headset, de forma a atuar como um sistema de aquisição para o sinal proveniente do sensor da haste de escuta. A placa de áudio possui uma entrada (microfone) e uma saída (fone), portanto, o sinal proveniente da haste pode ser escutado via fone e ao mesmo tempo aqusitado utilizando a saída e entrada de áudio, respectivamente. O Sinal é salvo em um cartão SD comum, no caso do experimento realizado foi utilizado um cartão SD da Sandisk Ultra modelo de 16Gb. Um cabo P2-P2 foi utilizado para conexão da saída de áudio do sensor da haste instrumentada para a placa de áudio USB. Adicionalmente, acoplou-se um dispositivo GPS modelo NEO-6M-0-001 ao Raspberry Pi, para que fosse possível obter as coordenadas da localização da medição visando uma melhor gestão de dados. A Figura 4.1 exibe os sistemas utilizados durante a aquisição de dados. A legenda “a” mostra o esquema de como serão realizadas medições e seus

pontos, enquanto a legenda “b”, “c” e “d” apresentam a representação esquemática do sistema utilizado, os componentes detalhados do sistema e uma das aquisições realizadas utilizando o celular, respectivamente.

O estudo experimental aqui apresentado tem como objetivo mostrar a possibilidade de aplicação de um sistema simples (*hardware* e *software*) como ferramenta adicional para facilitar a identificação do vazamento utilizando hastes de escutas instrumentadas, juntamente com teoria clássica de processamento digital, sem a exclusão da possibilidade de utilizar o método convencional, ou seja, “ascultar” e medir o sinal de vibração que se propaga ao longo da haste. O *Raspberry* pode ser acessado remotamente pelo próprio *smartphone* do usuário, através de qualquer aplicativo de assistência remota, bastando apenas utilizar a rede *wi-fi* disponível na *intranet* do *Raspberry*. A conexão é feita via login e senha padrão fornecida, para uma maior segurança.

As aquisições foram realizadas utilizando o sistema Siemens LMS Scada XS e posteriormente o procedimento foi repetido utilizando a placa de áudio USB conectada ao *Raspberry Pi*. Cada aquisição teve duração de 30 segundos com uma taxa de amostragem de 8,2 kHz. O ruído de fundo, assim como no Teste 5 do capítulo anterior, foi adquirido com a haste suspensa, afim de se obter um valor base como comparativo. O procedimento foi realizado com o sensor (haste) ao lado do vazamento (P_v), a 1m do vazamento (P_1), a 2m do vazamento (P_2) e a 3m do vazamento (P_3).

Ressalta-se aqui que a intenção principal é identificar a variação da severidade do sinal adquirido em função da distância do vazamento e sua faixa de frequência como possíveis parâmetros para a identificação do vazamento. Os sensores não são calibrados, dessa maneira não é possível obter um cálculo quantitativo da severidade da vibração medida e, como já mencionado, somente qualitativo enfatizando a presença ou não do vazamento. Entretanto, os sinais foram normalizados utilizando como base o ruído de fundo de cada sistema para que os sinais de vazamento adquiridos via SCADA e via *Raspberry* possam ser comparados. Para isso calculou-se o RMS (*Root Mean Square*) do sinal filtrado por um filtro passa banda entre 0.1-2 kHz e eliminando seu componente DC

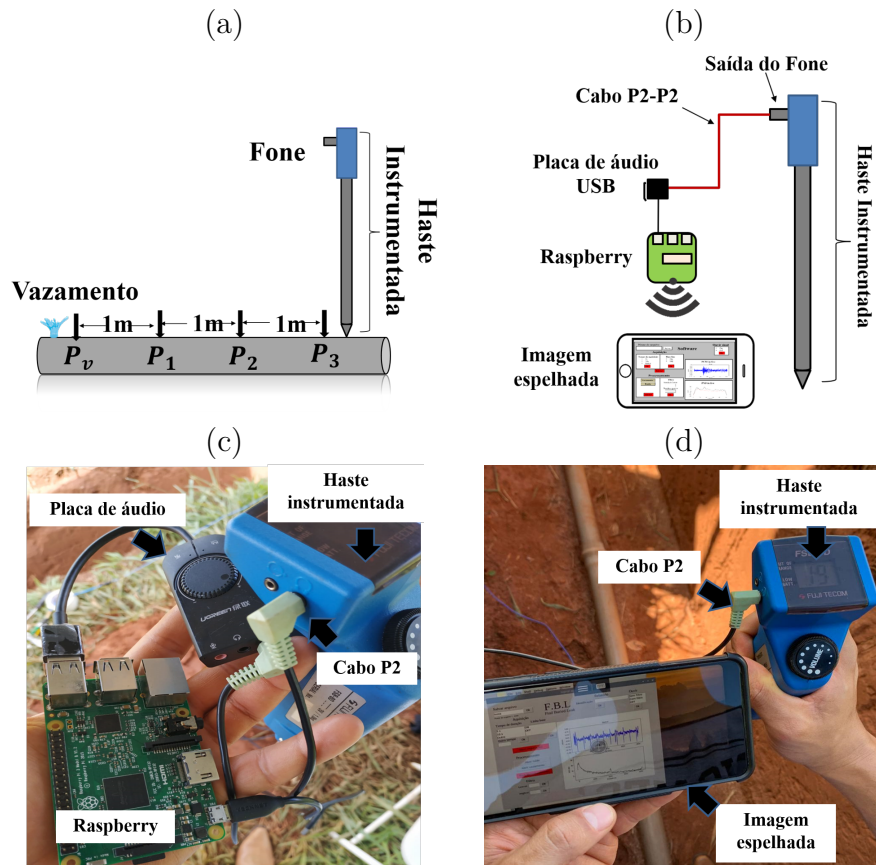


Figura 4.1: (a) Representação esquemática dos pontos de medições. (b) Representação esquemática no sistema de aquisição com o *Raspberry*. (c) *Raspberry Pi* com a placa de áudio USB e GPS conectados. (d) Imagem do programa espelhada no celular.

(valor médio do sinal), para cada sistema de aquisição. A faixa do filtro foi selecionada de acordo com a especificação da resposta linear do sensor que vem juntamente com a haste instrumentada (manual do usuário). O valor de RMS pode ser obtido com base na Eq. 4.1.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x_f^2(t) dt} \quad (4.1)$$

onde $x_f(t)$ é a função que descreve o sinal filtrado e T é o período de amostragem. Os valores de RMS_n (RMS dos sinais normalizados) encontrados por cada sistema utilizado, em cada ponto de medição, é apresentado na Figura 4.2. As linhas em preto e vermelho correspondem ao sinal adquirido com sistema Siemes e o *Raspberry*, respectivamente, sendo as linhas cheias para os sinais de vazamento e as pontilhadas para os sinais de ruído de instrumentação. Observa-se que os valores de RMS_n dos sinais medidos durante o vazamento tendem ao RMS_n do ruído de instrumentação, de seu respectivo sistema, a medida que se distância do ponto do vazamento, o que dificulta a detecção do mesmo com o aumento da distância relativa entre a haste e o vazamento, como é esperado, devido a elevada atenuação do sinal de vazamento ao longo do tubo. Observa-se também que o *Raspberry* apresenta uma queda brusca no RMS_n do sinal de vazamento do ponto P_v para o ponto P_1 (1 metro de distância entre os pontos) ficando muito próximo do seu ruído de instrumentação. Logo, essa ferramenta se comporta bem para detecções bem próximas da região do vazamento, mas é dificultado pela pequena diferença entre ruído de instrumentação e sinal adquirido para distâncias acima de 1 metro.

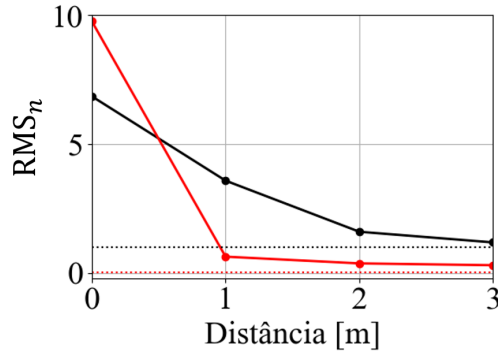


Figura 4.2: Valores de RMS_n dos sinais medidos. (As linhas cheias correspondem ao sinal medido durante o vazamento, enquanto a linha pontilhada representa o sinal do ruído de instrumentação. As linhas em preto indicam o sinal medido com o sistema de aquisição Siemens, enquanto as linhas em vermelho, as aquisições realizadas com o *Raspberry*).

Uma comparação entre os espectros dos sinais adquiridos utilizando o SCADA e o *Raspberry* é apresentado na Figura 4.3, onde a legenda “a” apresenta a PSD do sinal adquirido com o sistema de aquisição Siemens e a legenda “b” utilizando o *Raspberry*. As linhas cheias apresentadas nas Figuras representam as medições dos vazamentos enquanto as pontilhadas correspondem o ruído de instrumentação. As legendas “i”, “ii”, “iii” e “iv” representam as aquisições realizadas a 0m, ou seja, Pv (ponto de localização do vazamento), 1m, 2m e 3m do vazamento, respectivamente.

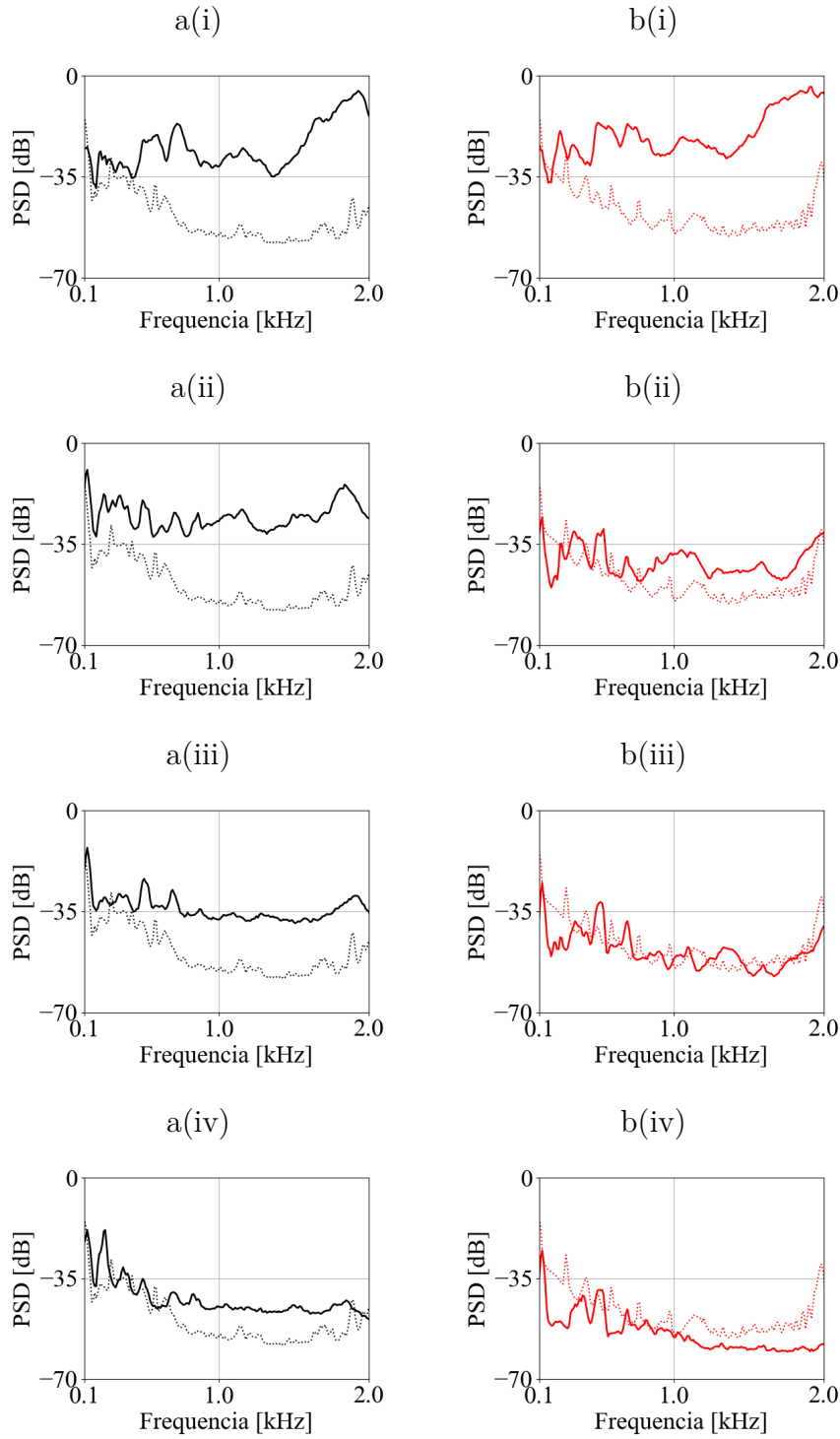


Figura 4.3: PSD do sinal obtido com o *Raspberry Pi* e o sistema de aquisição Siemens. (a) Medições utilizando o sistema de aquisição Siemens. (b) Medições realizadas com o *Raspberry*. (i) Medições realizadas ao lado do vazamento. (ii) Medições realizadas a 1m do vazamento. (iii) Medições realizadas a 2m do vazamento. (iv) Medições realizadas a 3m do vazamento. (Onde as linhas em preto correspondem as aquisições realizadas com o sistema Siemens e as linhas em vermelho correspondem as aquisições com o *Raspberry*).

Os resultados obtidos a partir do *Raspberry* apresentam tendências próximas as obtidas com o sistema Siemens, principalmente quando próximos do vazamento. Portanto, apesar de terem sido medidas no mesmo ponto, nota-se que as medições com o sistema Siemens apresentam uma melhor relação sinal-ruído quando comparada com as medições realizadas com o *Raspberry*, menos naquela onde está localizado o vazamento (P_v). Tal característica fica evidente quanto maior for a distância entre o ponto de medição e o vazamento. Um dos possíveis motivos para essa diferença é que o sistema Siemens conta com um ganho automático durante a aquisição do sinal, ou seja uma autorregulação do sinal de entrada, enquanto o sistema com o *Raspberry* esse ganho é fixo. Durante o processo de aquisição em campo foi preciso diminuir o ganho manual da haste pois as aquisições com o *Raspberry* estavam saturando (*clipped*). Além do mais a robustez de cabos e também da placa de áudio interferem diretamente nessa relação. Sendo assim, diminuindo o ganho do sensor da haste, diminuiu-se a sensibilidade do sistema como um todo, limitando principalmente entrada de aquisição do *Raspberry* que não possui um ganho automático. Portanto, o sistema contendo o *Raspberry* só foi capaz de detectar vazamentos claramente até uma distância de 1m (Figura 4.3b(ii)) e com certa dificuldade a 2m (Figura 4.3b(iii)). A partir de 3m o sinal do vazamento passa a ser muito próximo ao sinal de ruído de instrumentação do equipamento, como observado na Figura 4.3b(iv). Uma alternativa seria medir o sinal de ruído de fundo toda vez antes da medida para verificar sua influência, o que não foi feito nesse trabalho, pois foi utilizado somente o ruído de adquirido previamente às medições realizadas. Outra alternativa plausível seria utilizar uma interface de áudio e comparar o ruído de instrumentação com a que foi utilizada, visando encontrar uma placa/interface com melhor relação sinal-ruído.

4.2 Software desenvolvido

Foi desenvolvido um *software* com interface amigável para facilitar a visualização e processamento dos sinais para o usuário no campo. Todo o *software* foi desenvolvido

com base em programação *Python*. O esquema da interface do *software* desenvolvido para o usuário é mostrado na Figura 4.4(a), enquanto que um *screenshot* da tela do *smartphone* do usuário ao utilizar o programa é enfatizado na Figura 4.4(b). A frequência de amostragem é fixa e igual à 8,2 kHz, visto que, geralmente ruídos de vazamento quando medidos distantes de sua fonte (localização) possuem espectro de frequência abaixo de 2kHz, dessa maneira garantindo via frequência de Nyquist sinais abaixo desse limite superior.

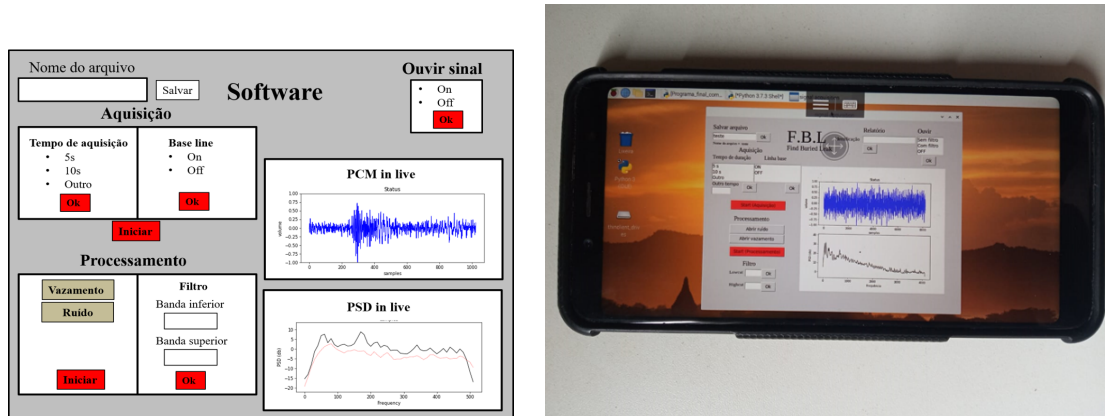


Figura 4.4: *Software* desenvolvido. (a) Esboço da interface do usuário com o *software*. (b) Interface do *software* espelhada no *smartphone*.

Este *software* é dividido em dois módulos. Um módulo, que é chamado de “aquisição de dados” e o outro “processamento de sinais”. Dessa maneira, o “módulo de aquisição de sinais” permite que o usuário defina o nome do arquivo a ser salvo, tempo total de aquisição e visualização preliminar dos dados. Esse módulo permite que o usuário acompanhe a gravação em tempo real do sinal no domínio do tempo e a média da densidade espectral cruzada (PSD – *Power Spectral Density*) calculada utilizando o método de Welch. O tempo de duração de aquisição é por default de 10 segundos, que é o tempo geralmente levado por técnicos para detectar a presença de vazamento, bem como considerado o tempo mínimo necessário para efetuar um processamento de sinais satisfatório, principalmente aquele relacionado com a PSD. Entretanto, é possível escolher arbitrariamente o tempo total de aquisição de acordo com a necessidade de análise ou de arquivamento de sinais. Aqui também é possível definir uma *baseline*,

como a aquisição do ruído de fundo antes da medida, como por exemplo, o ruído de instrumentação. Essa *baseline* é feita tendo como base a média de três aquisições de posições que o usuário acredite que não possua a presença de sinais que podem prejudicar a medida. Após cada etapa da calibração (aquisição para *baseline*) é possível descartar ou salvar a aquisição. Definida a *baseline*, esta pode ser plotada juntamente com a PSD do sinal, melhorando sua visualização. O programa converte e grava os dados sem nenhum processamento no formato “wav”, pois tal formato é o utilizado em técnicas de detecção acústica de vazamentos, principalmente por permitir que o usuário escute o sinal coletado de forma prática a qualquer momento.

O segundo módulo, chamado de módulo de “processamento de sinais”, como o próprio nome já diz, processa os sinais já adquiridos descrito na etapa anterior. Basicamente, este módulo consiste em calcular a PSD e o valor RMS, para uma verificação rápida no campo após a gravação. O sinal da PSD é mostrado no mesmo display do *smartphone* em tempo real. Caso necessário, o usuário pode escutar o sinal que está sendo gravado ativando a função “ouvir sinal” presente na interface.

Após a solicitação do processamento dos sinais, o usuário tem acesso a um relatório gerado automaticamente pelo programa em formato “.pdf” onde este possui a identificação do usuário, data e hora em que foi realizado o processamento, coordenadas do local e a PSD dos sinais analisados. Todo o processamento ocorre no microprocessador da placa do *Raspberry Pi*, apesar da entrada dos dados para o *software* ser realizada por meio do *smartphone*, conforme mostrado na Figura 4.5.

O *software* foi testado em campo, mas como descrito anteriormente, sua utilização foi limitada devido as características do sinal medido, ou seja, seu nível se aproxima muito rapidamente do ruído de fundo quando a haste está a uma distância superior a um metro do vazamento. Entretanto, fica evidente que seu uso pode facilitar a localização do vazamento se sinais menos corrompidos forem utilizados, como o caso do adquirido via SCADA.

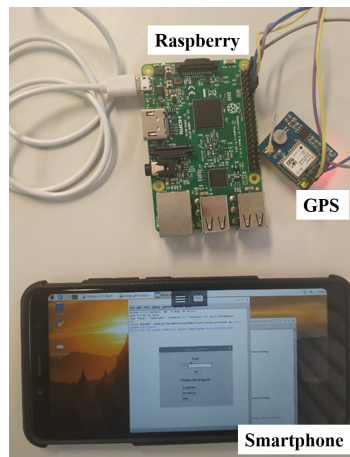


Figura 4.5: Interface gráfica do Raspberry Pi espelhada no *smartphone*.

4.3 Conclusão

Os resultados obtidos via dados processados, adquiridos com o sistema de aquisição Siemens e via *Raspberry Pi* possuem tendências bastantes semelhantes. Entretanto, o *Raspberry Pi* apresenta uma maior influência de ruídos de instrumentação dificultando a detecção de vazamentos a medida que a distância relativa entre a haste e o vazamento aumenta. Uma possível solução para esse problema seria a aplicação de filtros, para diminuir a interferência do ruído de fundo durante a aquisição, aplicação de ganho de forma que o sinal não sature, aumentando a robustez dos cabos (componentes móveis do sistema) e a utilização de uma interface de áudio portátil, melhorando a relação sinal-ruído. Entretanto, o *Raspberry Pi* apresenta uma possível viabilidade para utilização como sistema de aquisição e processamento de dados envolvendo problemas de detecção de vazamentos de um único canal.

O *software* desenvolvido para assistir a haste de escuta, mostrou-se efetivo ao fazer as aquisições e processamento dos dados, auxiliando na detecção da presença de vazamentos, claramente, até uma distância de 1m. Dessa forma, essa nova ferramenta mostrou-se bastante útil, tendo em vista que é uma solução que demanda pouco investimento e apresenta uma melhora significativa nas análises do operador, que não conta com o suporte de um sistema de aquisição.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Nesse capítulo serão apresentadas de forma objetiva as principais conclusões, retiradas de todo o trabalho desenvolvido nessa dissertação. Ao longo dessa jornada, observou-se, durante a análise dos dados, alguns pontos que poderiam ter sido implementados ou melhorados nos processos de realização desses experimentos. Esses pontos poderiam contribuir de forma significativa na melhoria desse trabalho, mas devida falta de tempo hábil, não foram possíveis de serem implementados. Por conta disso, serão apresentados aqui como sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Perdas em sistemas de distribuição de água trazem consequências tanto para as companhias de saneamento, quanto para o meio ambiente, já que um alto desperdício corresponde a uma necessidade de captação e produção maiores que o volume realmente exigido. A pressão e o fluxo de água são geralmente utilizados para detectar a área e a rede da tubulação que potencialmente tem a presença de vazamentos. As técnicas mais utilizadas para identificar e localizar o vazamento são as técnicas vibro-acústicas, tendo os correlacionadores de sinais os dispositivos que apresentam maior precisão em estimar a posição do vazamento ao longo da tubulação. Esses dispositivos utilizam a técnica da correlação cruzada e são muito efetivos em tubos metálicos, entretanto, quando aplicados à tubos de plástico essa técnica é drasticamente afetada devido a

elevada atenuação do sinal de vazamento. Tendo em vista essa limitação, desenvolveu-se um software para auxiliar na gestão da aplicação de correlacionadores em problemas de detecção de vazamento em tubos enterrados. Pode-se citar para este item que:

- O software foi desenvolvido utilizando um modelo de propagação de ondas, considerando a onda do tipo $s=1$ somente, ou seja, a onda caracterizada pelo bom acoplamento fluido-estrutura (*fluid bourne wave*). Não foi considerado, entretanto, os efeitos de ondas estruturais, por exemplo a $s=2$, as reflexões de ondas que podem estar presentes e dinâmica estrutural do sistema, como por exemplo, ressonâncias. O modelo foi validado utilizando sinais de vazamento adquiridos em campos de provas específicos para simulações de vazamento para validações de técnicas vibro-acústicas. Mostrou-se que o modelo, apesar das simplificações adotadas, possui uma tendência similar daqueles analisados nos casos reais. Tais tendências são relacionados a banda de frequência onde existe energia de vazamento, “forma” do módulo do espectro cruzado de frequência e a informação do atraso de sinal dado pelo gradiente da fase do espectro cruzado de frequência e o pico da correlação cruzada;
- A informação da banda de frequência calculada teoricamente via modelo de propagação de ondas pode ser utilizada para auxiliar na gestão do uso de correlacionadores de sinais de ruídos, visto que, quanto menor for essa banda para um problema específico, menor é a probabilidade de se obter uma estimativa confiável do atraso de sinais, portanto, a localização do vazamento também ficaria comprometida. Além da gestão, também pode-se utilizar o software para treinamento e entendimento da correlação cruzada e o gradiente da fase via simulação on-line auxiliando na popularização da técnica vibro-acústica de correlação cruzada.

Dentre as técnicas vibro-acústica de detecção de vazamento, a haste de escuta é o método mais simples, barato e utilizado para a detecção do mesmo. Essa técnica utiliza uma haste metálica de ponta fina que quando em contato com o tubo recebe parte

da energia vibratória do mesmo podendo ser auscultada pelo operador, facilitando sua detecção especialmente em tubos de difícil acesso, como por exemplo, os tubos de água enterrados. Justamente por se tratar do método vibro-acústico de detecção de vazamento mais popular, foi realizada a caracterização de uma haste de escuta instrumentada utilizando o sensor da própria haste juntamente com sensores (acelerômetros) comerciais tri-axiais de alta sensibilidade, e aplicando algumas ferramentas de processamento de sinais clássicas. Através dessa caracterização foi observado que:

- A haste de escuta instrumentada mostrou-se capaz de identificar a presença da energia de vazamento para uma distância de até 6m do mesmo, independentemente do tipo de ponta utilizada. Para distâncias superiores a essas não foi possível evidenciar a energia do sinal do vazamento medido acima do ruído de fundo/instrumentação. Quando analisado o comportamento vibratório da haste, observou-se que a melhor configuração de posição/eixos para a aquisição do sinal é onde o sensor se encontra fixado em sua extremidade utilizando a direção do seu eixo axial, justamente por apresentar a melhor coerência entre o sinal de entrada (vazamento) e saída do sinal adquirido (sensor conectado a haste de escuta);
- A rigidez de contato foi investigada de duas maneiras: alterando a ponta da haste e modificando a superfície a qual a haste é posiciona colocando um colar metálico ao redor do tubo. A primeira não apresenta alteração em relação a energia espectral medida (PSD). Entretanto, para o colar metálico notou-se que a energia espectral apresenta um leve aumento para alta frequência (acima de 1 kHz), quando comparada com a medição realizada diretamente na superfície da tubulação (PVC).

O uso da haste de escuta, mesmo que a instrumentada, fica limitado somente a “auscultar” o sinal adquirido, necessitando de um sistema mais elaborado, como um sistema de aquisição, para adquirir o sinal da mesma e posterior avaliação mais sistemática dos dados. Tendo em visto essa limitação, foi utilizado microprocessador modelo *Raspberry Pi 3* para processamento e operação de um *software* desenvolvido em linguagem *Python*,

juntamente com uma placa de áudio em uma de suas portas USB para aquisição do sinal. Utilizou-se um sistema de aquisição comercial para comprar os resultados obtidos via *Raspeberry*, dessa maneira:

- As medições, com ambos os dispositivos, apresentaram tendências bastantes semelhantes, o que mostra que a utilização do Raspberry Pi, mesmo com uma placa de áudio, pode ser viável para a aquisição e processamento de dados envolvendo problemas de detecção de vazamentos de um único canal. O uso desse dispositivo juntamente com um *software* com fácil interface com o usuário e processamento de sinais clássicos se mostrou promissor na detecção de vazamentos em tubos.

Sendo assim, esse trabalho apresentou propostas que podem diminuir o tamanho das lacunas presentes hoje, na detecção de vazamentos, seja na análise prévia da empregabilidade dos correlacionadores de ruído, ou no auxílio para análises do operador do equipamento. Todas as alternativas apresentadas são soluções de baixo custo capazes de empregar uma melhora significativa nas análises, bem como uma otimização de tempo empregado.

5.2 Trabalhos Futuros

Tendo em vista o trabalho realizado e visando possíveis melhoras que poderiam ter sido implementadas, ficam aqui algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolver um mecanismo de ponta em forma de arco capaz de se fixar a superfície externa da tubulação, para que sejam feitas novas aquisições. A intenção desse mecanismo é verificar se a vibração da tubulação é transmitida com menos perdas para a haste, já que interferiria na rigidez de contato da estrutura, como observado na seção 3.6;
- A caracterização do sistema de medição via *Raspberry Pi*, deve ser feita adquirindo o sinal de ruído de fundo antes de medir o ruído do vazamento para verificar sua

influência, em todas as medições, ao invés de utilizar uma média do ruído de instrumentação conforme utilizado na seção 4.1;

- Testar outras placas de áudio afim de comparar o ruído de instrumentação entre elas, visando encontrar uma placa com melhor relação sinal-ruído;
- Implementar uma bateria portátil externa ao sistema de medição via *Raspberry Pi*, de forma a torna-lo independente de uma alimentação externa de energia;
- Adicionar ao *software* desenvolvido para o sistema de medição via *Raspberry Pi*, um ganho automático ao o processo de aquisição, de forma que evite que o sinal adquirido sature facilmente;
- Encontrar um processamento de sinais eficiente que possa melhorar a localização do vazamento e banda de frequência a qual existe energia de vazamento.

5.3 Publicações

Durante esse projeto, os trabalhos publicados foram:

- Registro de Propriedade intelectual, com o *software*: “Banda de Frequência para Correlacionadores de Ruído de Vazamento (BaFCoRV)”;
- Artigo com o título “A Laboratory-Based Leak Noise Simulator for Buried Water Pipes”, enviado ao periódico *Applied Acoustics*, em 10 de janeiro de 2021.

Referências Bibliográficas

ALEGRE, H. Performance indicators for water supply services. *3ª Ed. U.K: IWA Publishing*, IWA publishing, 2016.

ALMEIDA, F. C. Lobato de; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; DRAY, S.; WHITFIELD, S.; PASCHOALINI, A. T. Measurement of wave attenuation in buried plastic water distribution pipes. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, v. 60, n. 5, 2014.

ALMEIDA, F. C. Lobato de; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; GAO, Y.; PASCHOALINI, A. T. The effects of resonances on time delay estimation for water leak detection in plastic pipes. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 420, p. 315–329, 2017.

ATTIA, H.; GAYA, S.; ALAMOUDI, A.; ALSHEHRI, F. M.; AL-SUHAIMI, A.; ALSULAIM, N.; NASER, A. M. A.; EDDIN, M. A. J.; ALQAHTANI, A. M.; ROJAS, J. P. *et al.* Wireless geophone sensing system for real-time seismic data acquisition. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 81116–81128, 2020.

AWWA. *The State of Water Loss Control in Drinking Water Utilities*. <https://www.awwa.org/Portals/0/AWWA/ETS/Resources/WLCWhitePaper.pdf?ver=2017-09-11-153507-487>: [s.n.], 2018. Acessado em fevereiro de 2020.

AZEVEDO, V. M.; MACIEL, A. M. A.; GAMA, K. S. da. Solução iot de monitoramento de poços para gerenciamento de recursos hídricos. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 3, n. 3, 2018.

BRENNAN, M. J.; GAO, Y.; AYALA, P.; ALMEIDA, F. C. Lobato de; JOSEPH, P.; PASCHOALINI, A. Amplitude distortion of measured leak noise signals caused by instrumentation: Effects on leak detection in water pipes using the cross-correlation method. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 461, p. 114905, 2019.

BRENNAN, M. J.; KARIMI, M.; ALMEIDA, F. C. Lobato de; LIMA, F. K. D.; AYALA, P.; OBATA, D.; PASCHOALINI, A.; KESSISSOGLOU, N. On the role of vibro-acoustics in leak detection for plastic water distribution pipes. *Procedia engineering*, Elsevier, v. 199, p. 1350–1355, 2017.

BRENNAN, M. J.; KARIMI, M.; MUGGLETON, J.; ALMEIDA, F. C. Lobato de; LIMA, F. K. de; AYALA, P.; OBATA, D.; PASCHOALINI, A.; KESSISSOGLOU, N. On the effects of soil properties on leak noise propagation in plastic water distribution pipes. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 427, p. 120–133, 2018.

- BRENNAN, M. J.; LIMA, F. K. D.; ALMEIDA, F. C. Lobato de; JOSEPH, P.; PASCHOALINI, A. A virtual pipe rig for testing acoustic leak detection correlators: Proof of concept. *Applied Acoustics*, Elsevier, v. 102, p. 137–145, 2016.
- BRENNAN MICHAEL J, P. M. J. e. G. Y. Some recent research results on the use of acoustic methods to detect water leaks in buried plastic water pipes. *ISVR Technical Memorandum*, p. 1–7, 2005.
- CARDOSO, A.; COSTA, E.; SOUSA, G. *O Potencial Educativo do Raspberry Pi*. [S.l.]: 16f, 2013.
- CHAGAS, J. S. Metodologia de pesquisa de vazamentos em redes de distribuição de água através das pressões manométricas. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC'2018*, 2018.
- COLOMBO, A. F.; KARNEY, B. W. Energy and costs of leaky pipes: Toward comprehensive picture. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 128, n. 6, p. 441–450, 2002.
- COSTA, R. F. Métodos e aplicações de técnicas de locação de vazamentos não visíveis em sistemas de abastecimento de água. *Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza*, 2011.
- DALMO F. C, V. A. N. C. E. M. F. F. Utilização do geofone eletrônico na pesquisa e detecção de vazamentos: estudo de caso. *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2007.
- DIAO, X.; CHI, Z.; JIANG, J.; MEBARKI, A.; NI, L.; WANG, Z.; HAO, Y. Leak detection and location of flanged pipes: An integrated approach of principle component analysis and guided wave mode. *Safety Science*, Elsevier, v. 129, p. 104809, 2020.
- DORNELAS, E.; CAMPELLO, S. Monitoramento de consumo doméstico de água utilizando uma meta-plataforma de iot. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 2, n. 2, 2017.
- EEA. *Use of freshwater resources in Europe*. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/use-of-freshwater-resources-3/assessment-4>: [s.n.], 2019. Acesso em fevereiro de 2020.
- FUCHS, H.; RIEHLE, R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis. *Applied acoustics*, Elsevier, v. 33, n. 1, p. 1–19, 1991.
- GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P.; MUGGLETON, J.; HUNAIDI, O. A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 277, n. 1-2, p. 133–148, 2004.
- GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; LIU, Y.; ALMEIDA, F. C. Lobato de; JOSEPH, P. F. Improving the shape of the cross-correlation function for leak detection in a plastic water distribution pipe using acoustic signals. *Applied Acoustics*, Elsevier, v. 127, p. 24–33, 2017.

- GONÇALVES, E.; ALVIM, P. R. A. Pesquisa e combate a vazamentos não visíveis. *Guias práticos: técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água*, v. 5, 2007.
- HEIN, W. Raspberry pi aplicado a projetos do mundo real. *Linux Magazine*, p. 52, 2013.
- HUNAIDI, O.; CHU, W.; WANG, A.; GUAN, W. Detecting leaks in plastic pipes. *Journal-American Water Works Association*, Wiley Online Library, v. 92, n. 2, p. 82–94, 2000.
- HUNAIDI, O.; WANG, A. A new system for locating leaks in urban water distribution pipes. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, Emerald Group Publishing Limited, v. 17, n. 4, p. 450–466, 2006.
- ISHAK, S.; MALIK, N. A.; LATIFF, N. A.; GHAZALI, N. E.; BAHARUDIN, M. Smart home garden irrigation system using raspberry pi. In: IEEE. *2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*. [S.l.], 2017. p. 101–106.
- JUNIOR, J. F. d. S. *Detecção de perdas em sistemas de distribuição de água através de rede de sensores sem fio*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2017.
- LAGU, S. S.; DESHMUKH, S. B. Raspberry pi for automation of water treatment plant. In: IEEE. *2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*. [S.l.], 2014. p. 1999–2003.
- LEAL, G. F. *WaterManna: a IoT na gestão de recursos hídricos*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ, 2019.
- LEITE, F. *Desperdício de água chega a 31,4pré-crise hídrica*. 2017. Disponível em: <<https://sao-paulo.estadao.com.br/noticias/geral, desperdicio-de-agua-chega-a-31-4-em-sp-e-ja-supera-os-anos-pre-crise-hidrica, 70001644433>>. Acesso em: 02 de março de 2018.
- LI, Y.; XU, Y.; ZHU, J.; LIU, T.; HOU, T.; LIU, L.; LIU, H.; XIN, Y.; LIN, T. Design, assembly and testing of a novel piezoelectric geophone based on pvdf film. *Integrated Ferroelectrics*, Taylor & Francis, v. 211, n. 1, p. 69–81, 2020.
- LIRA, X. J. C. *Detecção de vazamentos em redes de abastecimento de água através da utilização de séries de pressão e controle estatístico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2019.
- MANCINI, M. Internet das coisas: História, conceitos, aplicações e desafios. 06 2018.
- MEDINA, M. M. G. *Detecção de vazamentos em redes sob pressão baseada na análise dos sinais de pressão e vazão com um sistema de reconhecimento de padrões*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2017.

- MONTEIRO, M. R. P. d. S. *Estudo do método de resposta em frequência para localizar e quantificar vazamentos através do monitoramento de pressões e vazões em adutoras de água tratada*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006.
- OLIVEIRA, G.; MARCATO, F.; SCAZUFCA, P.; PIRES, R. Perdas de água 2018 (snis 2016): Desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico. *São Paulo: Instituto Trata Brasil*, 2018.
- PADILHA P. S. E NIIDA, O. I. Formação, treinamento, qualificação e certificação de pessoal em end de estanqueidade – detecção de vazamentos não-visíveis em redes pressurizadas. *PANNDT*, 2003.
- PAIVA, O. A.; MOREIRA, R. O. Raspberry pi: a 35-dollar device for viewing dicom images. *Radiologia brasileira*, SciELO Brasil, v. 47, n. 2, p. 99–100, 2014.
- PAPASTEFANOU, A. S.; JOSEPH, P. F.; BRENNAN, M. J. Experimental investigation into the characteristics of in-pipe leak noise in plastic water filled pipes. *Acta Acustica united with Acustica*, S. Hirzel Verlag, v. 98, n. 6, p. 847–856, 2012.
- PINNINGTON, R.; BRISCOE, A. Externally applied sensor for axisymmetric waves in a fluid filled pipe. *Journal of Sound and vibration*, Elsevier, v. 173, n. 4, p. 503–516, 1994.
- PINTO, S. S. D. *Sistema robotizado autônomo para inspeção de tubulações*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás (UFG), 2017.
- SENSUS. *Fountain Valley, California Beats Water Reduction Goal with Sensus Technology*. 2016. Disponível em: <<https://sensus.com/resources/case-studies/fountain-valley-california-beats-water-reduction-goal-sensus-technology/>>. Acesso em: 15 de julho de 2020.
- SHIN, K.; HAMMOND, J. *Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- SILVA, G. S.; TAMAKI, H. O.; LOUREIRO, R. S.; GONÇALVES, O. M. Eliminação de vazamentos em redes externas no contexto de programas de uso racional da água—estudo de caso: Universidade de são paulo. *Ambiente Construído*, v. 8, n. 2, p. 41–52, 2008.
- SONG, K.; YANG, Y.; GUO, Y.; TONG, S.; DONG, L. A low-frequency geophone designed by genetic algorithms. In: IEEE. *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. [S.l.], 2017. p. 3421–3424.
- SOUZA, A. L. *Detecção de Vazamentos em Tubulações através da Análise Espectral de Transientes de Pressão*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- SOUZA, M. M. de; JÚNIOR, J. T.; ANTUNES, F. d. S.; NUNES, C. M. Uso do gpr para detecção de vazamentos de água. estudo de caso: Parque gráfico do jornal o globo-rj. *Águas Subterrâneas*, 2006.

SUN, P.; GAO, Y.; JIN, B.; BRENNAN, M. J. Use of pvdF wire sensors for leakage localization in a fluid-filled pipe. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 3, p. 692, 2020.

UN. *Sustainable Development Goals*.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>, 2020. Acessado em Fevereiro de 2020.

VALESCO, C. *Brasil perde quase 40% da água tratada com vazamentos e fraudes, aponta estudo*. 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/brasil-perde-quase-40-da-agua-tratada-com-vazamentos-efraudes-aponta-estudo.ghhtml>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2019.

VALESCO, C. *Desperdício de água potável aumenta no Brasil, e perdas chegam a mais de R\$ 10 bilhões ao ano*. 2017.

Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/desperdicio-de-agua-potavel-aumenta-no-brasil-e-perdas-chegam-a-mais-de-r-10-bilhoes-ao-ano-aponta-ghhtml>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2019.

WADEKAR, S.; VAKARE, V.; PRAJAPATI, R.; YADAV, S.; YADAV, V. Smart water management using IoT. In: IEEE. *2016 5th International Conference on Wireless Networks and Embedded Systems (WECON)*. [S.l.], 2016. p. 1–4.

YOON, D.-B.; PARK, J.-H.; SHIN, S.-H. Improvement of cross-correlation technique for leak detection of a buried pipe in a tonal noisy environment. *Nuclear engineering and technology*, Korean Nuclear Society, v. 44, n. 8, p. 977–984, 2012.

ZANIBONI, N. *Equipamentos e metodologias para o controle e redução de perdas reais em sistemas de abastecimento de água*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.

ZANIBONI, N.; TSUTIYA, M. Equipamentos e metodologia para o controle e redução de perdas reais em sistemas de abastecimento de água. *Revista DAE*, v. 57, p. 45–52, 2009.

Apêndice A

Detalhes da construção do software on-line

A.1 Programação

O site foi desenvolvido em um framework de desenvolvimento rápido para web, gratuito e de código aberto, escrito em linguagem de programação Python, chamado *Django*. Essa ferramenta utiliza o padrão model-template-view, para estruturar e manipular os dados do seu aplicativo da Web. O model (modelos) são objetos em Python que definem a estrutura dos dados de um aplicativo. Esses modelos fornecem mecanismos para gerenciar bancos de dados como : adicionar, modificar e excluir, bem como consultar registros. A view é uma função que manipula solicitações, ela recebe as solicitações por meio dos models e retornam respostas em HTTP através do template. O template por sua vez, é um arquivo de texto que define a estrutura ou o layout de um arquivo, com espaços previamente alocados para representar o conteúdo real. Resumindo, uma view pode criar dinamicamente uma página HTML usando um template HTML, preenchendo-a com dados de um model. Esse framework dispõe de uma arquitetura de alto nível, o que permite colocar os projetos Python na web, sem se preocupar com a infraestrutura de código necessária para isso. Essa estrutura pode ser observada com maior detalhe na Figura A.1.

Template

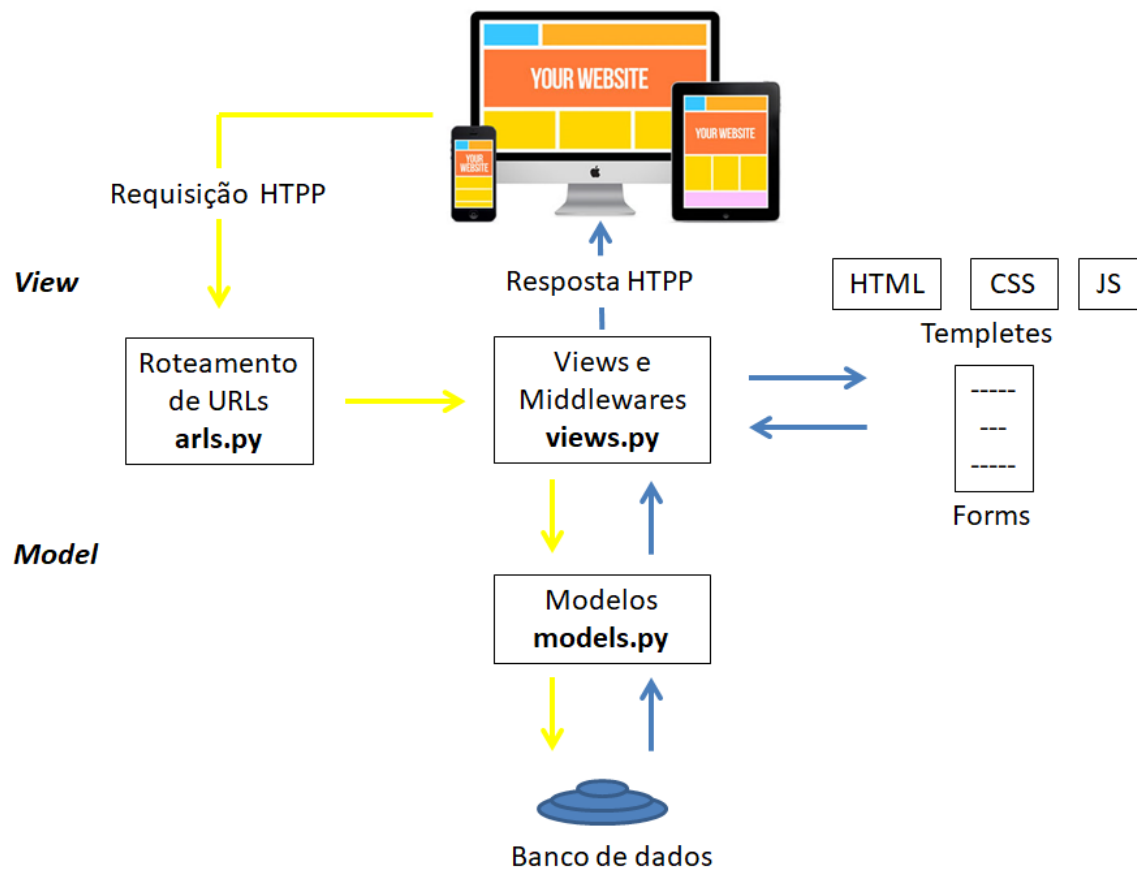


Figura A.1: Fluxo de uma requisição no Django.

A.2 Software com interface gráfica via HTML

O software foi dividido em dois módulos, o módulo "Banda de frequência", onde apresenta a banda de frequência efetiva simulada, e o módulo "Correlacionadores", que apresenta o pico e a fase da correlação cruzada dos dados simulados. Ambos os módulos possuem a mesma interface gráfica para entrada dos dados e podem ser acessados diretamente pelo menu da interface HTML, conforme apresentada na Figura A.2.

A interface gráfica do software é apresentada em uma janela web. No topo, há uma barra de menu com dois itens: "Correlacionadores" (destacado em azul) e "Banda de frequência". Uma seta vermelha aponta para este menu com o rótulo "Seleção do módulo". Abaixo do menu, há logotipos de "unesp" e "FAPESP". O título principal do programa é "Título do programa". À esquerda, sob o cabeçalho "Propriedades do tubo", há uma seção "Instruções iniciais:" com o texto: "Preencha todos os campos disponíveis, com números positivos e maiores que zero, para continuar" e "Valores default: diâmetro externo (50 mm), espessura (1.6 mm), distância (5 m)". Abaixo das instruções, há campos de entrada para: "Tipo de tubo:" (menu suspenso com "PVC" selecionado), "Tipo de sensor:" (menu suspenso com "Acelerômetro" selecionado), "Tipo de solo:" (menu suspenso com "ARENOSO" selecionado), "Diâmetro externo do tubo (mm):" (campo de texto com "50"), "Espessura do tubo (mm):" (campo de texto com "1.6") e "Distância entre os sensores (m):" (campo de texto com "5"). Um botão "Calcular" está na base. À direita, há uma "Representação Esquemática do Sistema" que mostra um tubo horizontal com dois sensores, "Sensor A" e "Sensor B", separados por uma "Distância entre os sensores(m)". Um círculo ao lado do tubo indica a "Espessura do tubo" e o "Diâmetro externo". Uma seta verde aponta para os campos de entrada com o rótulo "Dados de entrada".

Figura A.2: Dados de entrada dos programas.

Através dessa interface o operador tem como dados de entrada do sistema:

- O tipo de solo em que ocorrerá o experimento, seja ele arenoso, argiloso ou ar, caso o experimento não seja realizado em tubulação enterrada;
- O material utilizado na tubulação (PVC, MDPE, ferro fundido ou concreto);
- As medidas da tubulação como espessura e o diâmetro externo. As medidas mínimas são 1,6mm e 50mm respectivamente, conforme estabelecido na norma NBR 12218.
- O tipo de sensor utilizado na medição (acelerômetro, hidrofone e geofone);

- A distância em que se encontram os dois sensores. A distância mínima necessária entre os sensores é de 5m visando atender as considerações/simplificações adotadas no modelo de forma que os resultados simulados sejam condizentes com as aproximações dos casos reais.

Instruções iniciais:

Preencha todos os campos disponíveis, com números positivos e maiores que zero, para continuar

Valores default: diâmetro externo (50 mm), espessura (1.6 mm), distância (5 m)

Tipo de tubo:

Tipo de sensor:

Tipo de solo:

Diâmetro externo do tubo (mm):

Espessura do tubo (mm):

Distância entre os sensores (m):

Figura A.3: Dados de entrada dos programas.

A partir dos dados de entrada a simulação pode ser feita. Para exemplificar os resultados apresentados em cada módulo foram feitas simulações tendo como dados de entrada o acelerômetro como sensor, a uma distância de 5m com uma tubulação de PVC suspensa (não está enterrada), com diâmetro externo de 50mm e 1,6mm de espessura. A Figura A.4 apresenta o resultado da simulação para o módulo "Banda de frequência", onde apresenta em forma gráfica a densidade espectral cruzada (DEC) calculada, identificando os limites da banda de frequência superior e inferior (estimada pelo valor base de 0,1 do módulo da CPSD normalizada), bem como sua frequência de pico. A Figura A.5 por sua vez, apresenta o resultado da simulação para o módulo "Correlação" na forma de gráficos dinâmicos que correspondem ao valor do atraso de sinal (correlação cruzada), fase e a velocidade máxima da propagação do ruído de vazamento dos valores simulados. Esses gráficos são exibidos inicialmente posicionando o vazamento entre os dois sensores (no meio), mas são recalculados a medida que o usuário desloca o *slider bar* (simulador de distância) correspondente a distância do sensor "A" em relação ao vazamento.

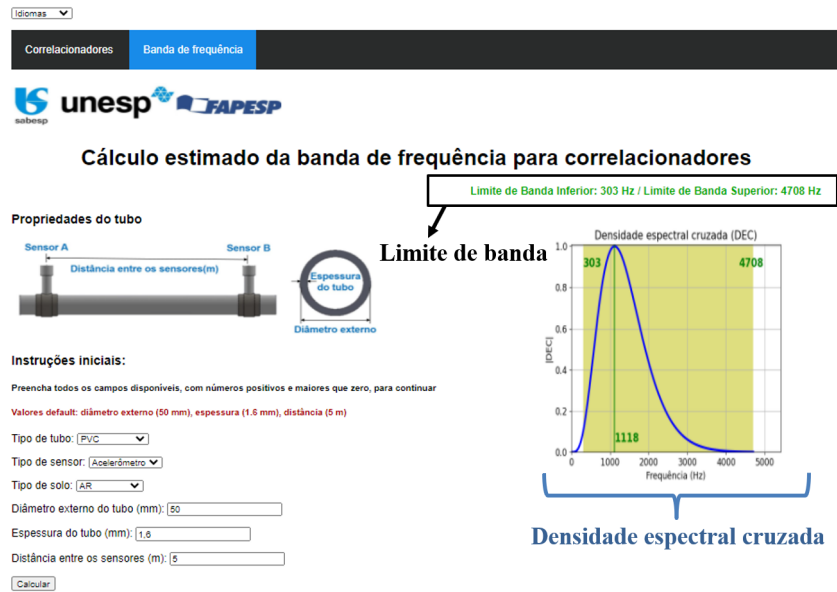


Figura A.4: Resultado da simulação do cálculo estimado da banda de frequência para correlacionadores.

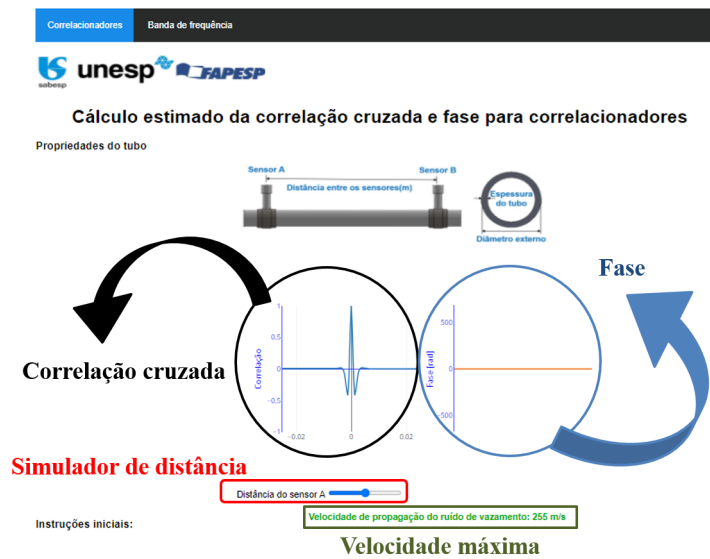


Figura A.5: Resultado da simulação do cálculo estimado da correlação cruzada e fase para correlacionadores.