



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 C zar, Sillas de Oliveira
Uso de Python e conceitos de internet das coisas aplicados  
técnicas vibro-acústicas clássicas para detec o de vazamentos /
Sillas de Oliveira C zar. -- Bauru, 2021
103 p. : tabs., fotos

Disserta o (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Fabrício César Lobato Almeida


1. Haste de escuta. 2. Detec o. 3. Vazamento. 4. IoT. I.
Título.

Sistema de gera o 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 César

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 locate 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) 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.	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 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).	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 Pi</i> com a placa de áudio USB e GPS conectados. (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)

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a) o texto completo desta Dissertação será disponibilizado somente a partir de 23/04/2023.

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.

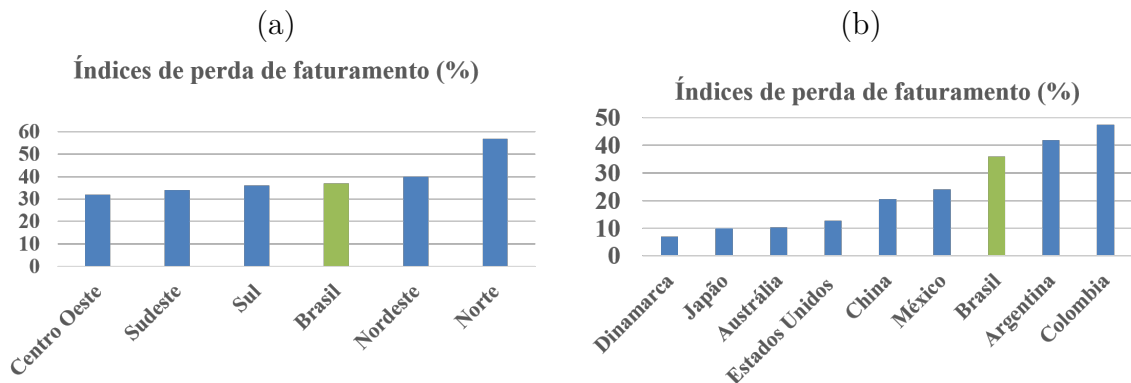


Figura 1.1: (a) Comparação de índices de perda de faturamento das regiões do Brasil; (b) Comparação de Índices de perda de faturamento de água entre países (Adaptado de Oliveira et al. (2018)).

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.

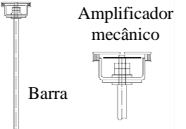
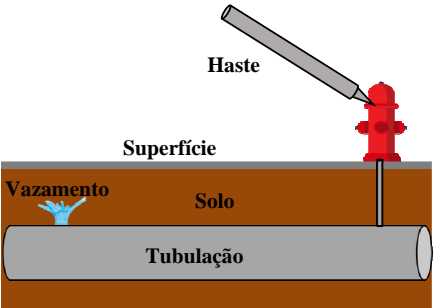


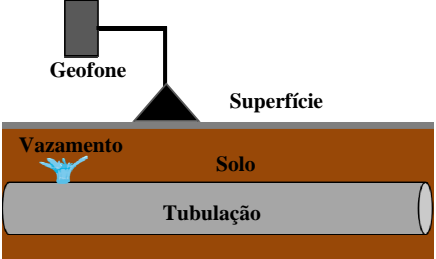


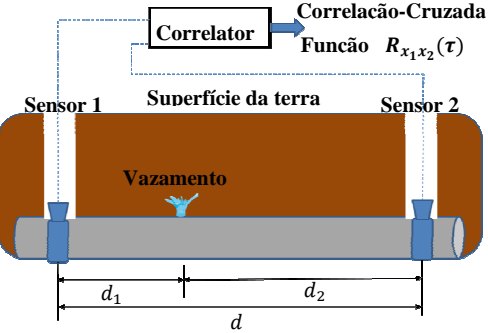
Tipo		Foto	Esquema
Haste	Analogica	 <p>Amplificador mecânico Barra</p> <p>Fonte: Hunaidi, 2000</p>	 <p>Haste</p> <p>Superfície</p> <p>Vazamento Solo</p> <p>Tubulação</p>
	Digital	 <p>Indicador de nível Nível sonoro Bateria</p> <p>Saída de sinal Entrada do fone Liga/desliga Volume</p> <p>Haste de contato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

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 A 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 (regulamentações, 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 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 posicionada 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 vista 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. *Strojnikski 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 31,4 pré-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 pvd 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 pvdw 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.