



Uso de Câmeras e Técnicas de Visão Computacional Aliadas à Métodos Vibro-Acústicos na Localização de Vazamento em Tubos Enterrados

Bruno Cavenaghi Campos⁽¹⁾

De 2016-2021, fez graduação na área de Engenharia Mecânica na instituição UNESP, Bauru. Em 2019 participou de um estágio de pesquisa na instituição Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica desenvolvendo um projeto de pesquisa em Análise Modal Operacional utilizando vídeo câmeras. Em 2022 ingressou no Mestrado em Engenharia Mecânica na Unesp Bauru, desenvolvendo uma nova técnica para detecção de vazamentos de água em tubos enterrados utilizando vídeo câmeras. Em 2023 participou de um estágio de pesquisa na Università di Trento, Itália.

Endereço⁽¹⁾: Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube 14-01- Vargem Limpa - Bauru – SP - CEP: 17033-360 - Brasil - Tel: (14) 3103-6000 - e-mail: bruno.cavenaghi@unesp.br.

RESUMO

Vazamentos em sistemas de distribuição de água elevam o desperdício entre estações de tratamento e consumidores. Correlacionadores de ruído de vazamento são geralmente empregados para estimar a posição do vazamento em tubos enterrados. Entretanto, o acesso a pontos de medidas pode apresentar limitações físicas dificultando ou impedindo o posicionamento dos sensores desses dispositivos. Neste estudo, câmeras são utilizadas como sensores de vibração não-contato, onde os sinais dos pontos de medida são capturados aplicando técnicas de visão computacional aos vídeos gravados. Ferramentas clássicas de processamento de sinais são aplicadas aos sinais adquiridos pela câmera para a identificação do ruído de instrumentação, bem como, para verificar sua capacidade/sensibilidade em localizar vazamentos em uma situação controlada. Testes foram realizados em uma bancada experimental portátil que simula respostas de vibração devido a vazamentos em tubos enterrados onde o atraso de sinal e estimativa da localização de vazamento foi efetuada. Foram avaliados diferentes tipos de câmeras, sua sensibilidade na detecção dos vazamentos, bem como, os resultados foram comparados com medidas de acelerômetros de alta sensibilidade geralmente utilizados em correlacionadores comerciais de ruído de vazamento. Os resultados se mostraram promissores na detecção de vazamentos e acredita-se no potencial uso de câmeras na gestão de perdas.

PALAVRAS-CHAVE: Localização de Vazamentos, Câmeras de Vídeo, Medições Não-Contato.

INTRODUÇÃO

Uma grande quantidade de água é perdida em muitos sistemas de distribuição de água entre a estação de tratamento e os consumidores. Em países em desenvolvimento, a perda de água pode atingir níveis alarmantes. No Brasil, 38% da água potável total é perdida antes de chegar às residências e indústrias, com alguns estados perdendo cerca de 70% de sua água potável (RIBEIRO, 2018). Na cidade de São Paulo, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) estima que cerca de 3,5 bilhões de litros de água por dia passam pelas redes de distribuição da cidade e a taxa de perda de água chega a 30%. Vazamentos correspondem a 19,5%, e fraudes e furtos de água diretamente da rede correspondem a 10,5%. No Reino Unido, estima-se perfurar 4 milhões de buracos na rede viária a cada ano para instalar tubulações e reparar vazamentos. O impacto econômico da restauração é estimado em US\$10 bilhões anualmente. Outro aspecto do risco de vazamento é a tendência de os vazamentos crescerem. Para redes de água, vazamentos crescentes podem introduzir patógenos e contaminantes do ambiente na rede (ROYAL, et al., 2011; ALKASSEH, 2013).

Existem diferentes tipos de técnicas e dispositivos de detecção de vazamentos. Sensores de pressão e vazão de água, por exemplo, podem ser usados para estimar regiões onde a perda de água é crítica. Levantamentos de vazamentos podem então ser conduzidos nesta área inicial usando técnicas mais precisas. Estas incluem Métodos de Imagem Térmica (TIM) (SHAKMAK, 2015), onde câmeras térmicas/sensores infravermelhos são usados para examinar o gradiente de temperatura da superfície do solo, Radar de Penetração no Solo (GPR) (YUSSOF, et al., 2022), e técnicas acústicas (AT) (KILINSKI, 2019; HUNAIDI, et al., 2000). Métodos TIM e GPR usam sensores sem contato, enquanto sensores AT são colocados em posições de contato onde as respostas do tubo/solo são medidas. Além disso, estes últimos são geralmente usados devido ao seu baixo custo e portabilidade (por exemplo, bastões de escuta). Correlacionadores de ruídos de vazamento, que são dispositivos mais avançados, podem estimar regiões

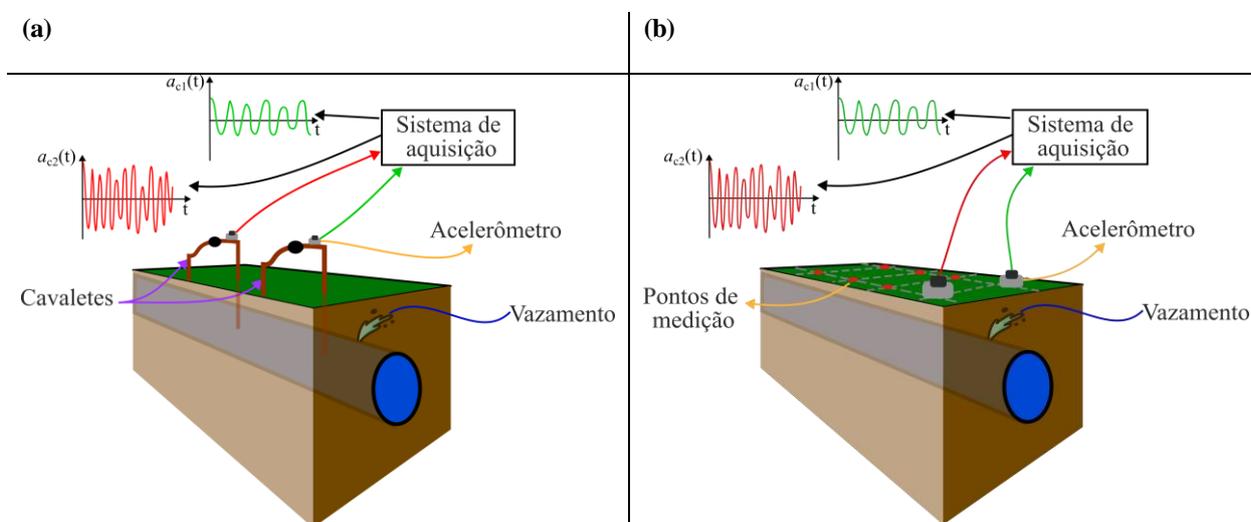


onde há um vazamento usando duas medições onde sensores são colocados na parede do tubo ou em hidrantes conectados ao sistema de tubulação (KILINSKI, 2019). Este dispositivo usa a função de correlação cruzada para calcular o tempo de chegada (atraso) do sinal entre os dois sensores. O atraso de tempo, junto com o conhecimento da velocidade do ruído de vazamento, é usado para estimar sua posição no tubo. Mais recentemente, medições de vibração do solo têm sido usadas para detectar objetos próximos a superfície (IWANAGA, et al., 2022b) e vazamentos em um tubo enterrado (CASADO, et al., 2023), usando sensores de contato. Além disso, câmeras também têm sido usadas para medir a resposta mecânica de sistemas vibratórios (JAVH, et al., 2018; PRATICO, et al., 2020). Este trabalho investiga o uso de câmeras de alta velocidade para medir a resposta de vibração do tubo, como uma abordagem sem contato para estimar a posição do vazamento usando utilizando técnicas de correlação cruzada, as mesmas utilizadas em correlacionadores comerciais de ruído de vazamento.

MEDIÇÕES DA RESPOSTA DO TUBO USANDO VIBRAÇÃO DO SOLO.

As empresas de distribuição e saneamento frequentemente buscam técnicas menos invasivas para detectar vazamentos de água. Radar de penetração no solo, campos eletromagnéticos quase-estáticos de baixa frequência e técnicas vibro-acústicas são métodos comumente usados. No entanto, usar apenas uma técnica pode não fornecer informações suficientes para uma detecção precisa de vazamentos e localização de encanamentos enterrados. Hastes de escuta têm sido usadas há muitos anos para pesquisas de detecção de vazamentos, onde a haste é colocada em contato com o tubo/hidrante ou o solo próximo a região do vazamento. A haste é responsável por “extrair” parte da energia vibratória do tubo onde é amplificada mecanicamente via câmara acústica localizada em uma das extremidades da haste (dispositivo analógico), ou via um sensor (amplificação digital). Essa técnica usa apenas informações de amplitude para detectar o vazamento, então a Densidade Espectral de Potência (PSD-*Power Spectral Density*) pode ser usada como uma ferramenta para auxiliar na busca por um vazamento. Alternativamente, técnicas de dois sensores podem ser empregadas, onde dois sensores são colocados em pontos de medidas específicos medir a resposta do tubo devido à excitação de vazamento. Medições no solo acima do tubo também podem ser efetuadas, uma vez que a vibração do tubo é irradiada através do solo devido acoplamento entre o meio e a parede do tubo. Essa técnica (dois sensores) mede tanto a magnitude da vibração quanto a fase entre os sinais medidos em cada sensor, o que melhora a detecção e localização de vazamentos. A medição de fase é especialmente crucial, pois contém informações de atraso entre os sinais medidos, as quais são mais robustas ao ruído, enquanto a magnitude é útil para estimar a largura de banda de frequência sobre a qual as informações de atraso de tempo podem estar presentes (MUGGLETON, et al., 2011). Um esquema de medições de superfície do solo usando dois sensores é representado na figura 1. Medições similares à mostrada na Figura 1, mas feitas no tubo ou em pontos de medidas no solo também podem ser efetuadas

Figura 1 - Esquema de uma abordagem de dois sensores para medições de vibração considerando (a) medição no tubo via sensores acoplados a cavaletes e (b) medição no solo com intuito de localizar o tubo enterrado e o vazamento.



Fonte: Elaboração Própria.

Esses sensores são colocados em pontos de medidas específicos como cavaletes ou hidrantes, como mostrado na Figura 1(a) ou até mesmo na superfície do solo como mostrado na Figura 1(b). Em ambos os casos o atraso de sinal



entre os dois sensores é estimado, sendo esta via gradiente da fase da Densidade Espectral Cruzada de Potência (CPSD-Cross Power Spectral Density) ou via pico do Coeficiente da Correlação Cruzada (CCC-Cross Correlation Coefficient), ambos métodos usados tanto para encontrar o tubo enterrado como para localizar o vazamento (IWANAGA, et al., 2022b). Além disso, a amplitude medida por cada sensor também pode ser usada, já que o sinal é atenuado conforme o ruído de vazamento se propaga pelo solo se distanciando da fonte. Portanto, quanto mais próximo o sensor estiver do tubo/vazamento, maior é a amplitude medida. Ressalta-se que medidas de superfície do solo com sensores de contato (geofone e acelerômetro) têm alguns problemas práticos, como a fixação do sensor na superfície do solo, e, em alguns momentos, um conjunto maior de sensores é necessário (ZAMAN, et al., 2020). Já para as medições em pontos de medias específicos o difícil acesso impossibilita em alguns casos o uso de sensores contato. Portanto, o uso de sensores não contato pode ser uma alternativa viável para superar alguns desses problemas. A principal vantagem das câmeras de vídeo é que cada pixel funciona como um sensor individualmente, então é possível analisar muitos pontos (posições de medição) com uma única medida (CHEN, et al., 2017).

PROCESSAMENTO DE SINAIS CLÁSSICOS

O processo de estimativa de atraso de tempo a partir dos sinais de vazamento medidos por dois ou mais sensores necessita de algumas etapas. Primeiro, é interessante realizar o cálculo da função de Densidade Espectral Cruzada de Potência (CPSD), cujo resultado pode ser usado para observar a distribuição de potência entre dois sinais específicos no domínio da frequência. Além do mais pode-se calcular a CPSD do ruído de fundo, onde é possível fornecer uma estimativa inicial da largura de banda útil, ou seja, a faixa de frequência que possui uma maior relação sinal-ruído. A função CPSD é definida como (BENDAT e PIERSOL, 2010):

$$S_{x_1x_2}(\mathbf{f}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E[X_1^*(\mathbf{f})X_2(\mathbf{f})]}{T} \quad \text{equação (1)}$$

Onde $E[\]$ é o operador de esperança estatística, $X_1(\mathbf{f})$ e $X_2(\mathbf{f})$ são as transformadas de Fourier dos sinais temporais $x_1(\mathbf{t})$ e $x_2(\mathbf{t})$ respectivamente, $X_1^*(\mathbf{f})$ é o conjugado complexo de $X_1(\mathbf{f})$, e T é o intervalo de tempo dos sinais. Note que $S_{x_1x_2}(\mathbf{f})$ pode ser escrito como $|S_{x_1x_2}(\mathbf{f})|e^{i\phi(\mathbf{f})}$, no qual $|S_{x_1x_2}(\mathbf{f})|$ é o módulo e $\phi(\mathbf{f})$ é a fase entre os dois sinais na frequência \mathbf{f} . O subscrito 1 e 2 são referentes aos pontos de medidas, como por exemplo, cavalete 1 e cavalete 2 conforme ilustrado na Figura 1.

Em seguida, deve-se calcular a função de coerência entre os sinais. Esta função varia entre 0 e 1 e indica o grau de associação linear ou similaridade entre os sinais. Ao realizar essa análise, é possível selecionar melhor a largura de banda em que os sinais têm mais correlação entre si e menos interferência externa. A função de coerência é definida como (BENDAT e PIERSOL, 2010):

$$C_{x_1x_2}(\mathbf{f}) = \frac{|S_{x_1x_2}(\mathbf{f})|^2}{(S_{x_1x_1}(\mathbf{f}) \cdot S_{x_2x_2}(\mathbf{f}))}, \quad \text{equação (2)}$$

onde $S_{x_1x_1}(\mathbf{f})$ é a densidade espectral de potência (PSD) de $x_1(\mathbf{t})$, e $S_{x_2x_2}(\mathbf{f})$ é a densidade espectral de potência de $x_2(\mathbf{t})$. As PSDs mostram qual a energia contida em cada ponto de medida a qual os sensores estão acoplados ou montados.

A função de correlação cruzada, quando as médias dos sinais medidos são ajustadas para zero, é dada por (BENDAT e PIERSOL, 2010; ALMEIDA, et al., 2014):

$$R_{x_1x_2}(\tau) = E[x_1(\mathbf{t})x_2(\mathbf{t}+\tau)], \quad \text{equação (3)}$$

onde τ é o atraso de tempo. O atraso de tempo que resulta na maior similaridade entre os dois sinais (indicado por um pico na função de correlação cruzada) é considerado uma estimativa do atraso de tempo (t_0) entre os sinais. Em casos práticos é melhor apresentar a função de correlação cruzada em uma forma padronizada que varia de -1 a 1. Essa normalização permite comparar duas funções de correlação cruzada independentemente da amplitude do sinal. Isso é chamado de coeficiente de correlação cruzada (ALMEIDA, et al., 2014):



$$\rho(\tau) = \frac{\mathbf{R}_{x_1x_2}(\tau)}{\sqrt{\mathbf{R}_{x_1x_1}(\mathbf{0})\mathbf{R}_{x_2x_2}(\mathbf{0})}}, \quad \text{equação (4)}$$

onde $\mathbf{R}_{x_1x_1}(\mathbf{0})$ e $\mathbf{R}_{x_2x_2}(\mathbf{0})$ são as funções de autocorrelação dos sinais $\mathbf{x}_1(\mathbf{t})$ e $\mathbf{x}_2(\mathbf{t})$, respectivamente, quando $\tau = \mathbf{0}$.

A função de correlação cruzada está relacionada à Transformada de Fourier da função de densidade espectral cruzada (CPSD) por (ALMEIDA, et al., 2014):

$$\mathbf{R}_{x_1x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{S}_{x_1x_2}(f) e^{i2\pi f\tau} df. \quad \text{equação (5)}$$

DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO DE TESTE E SIMULAÇÃO.

Um dispositivo personalizado (IWANAGA, et al., 2022a; BRENNAN, et al. 2019), que reproduz a resposta de vibração do tubo devido à excitação gerado por um vazamento (usando *shakers*), é usado aqui para investigar a viabilidade do uso de câmeras como uma ferramenta para medições sem contato. Embora o dispositivo não reproduza uma resposta de vibração do solo, ele pode ser usado para realizar uma investigação inicial, já que o atraso de tempo entre dois sinais e a atenuação entre duas posições de medição diferentes podem ser pré-definidos sob condições estritas. Além do mais, o processamento de sinais clássico é o mesmo utilizado para medições no solo ou para medições no tubo, ou pontos de medidas conforme mencionado anteriormente. Um esquema do sistema físico (tubo enterrado) que o dispositivo de teste pode reproduzir é mostrado na figura 2(a). O ruído do vazamento é atenuado ao viajar pelo tubo em termos de amplitude e conteúdo de alta frequência, de modo que o tubo atua como um filtro mecânico (ALMEIDA, et al., 2014). Portanto, quanto maior a distância que o ruído do vazamento percorre, maior a perda de energia. Essa característica também é representada na figura 2(a) pelos históricos de tempo coletados pelo sensor 1 ($P1, \mathbf{a}_{c1}(\mathbf{d}_1, \mathbf{t})$) e pelo sensor 2 ($P2, \mathbf{a}_{c2}(\mathbf{d}_2, \mathbf{t})$), onde $\mathbf{d}_1 > \mathbf{d}_2$ e se referem as distâncias entre os respectivos sensores e o vazamento. O modelo do tubo usado na configuração de teste é baseado na abordagem de ondas, considerando que a energia do vazamento é predominantemente transmitida ao longo do tubo via um tipo de onda predominantemente transportada pelo fluido, onde há um forte acoplamento entre o fluido e a parede do tubo (BRENNAN, et al., 2018). Isso significa que tanto sensores de fluido (hidrofonos) quanto estruturais (ou seja, acelerômetros) podem ser usados em pesquisas de detecção de vazamentos de água. O dispositivo de teste, no entanto, simula a aceleração da parede do tubo devido a um vazamento. Portanto, a aceleração da resposta da parede do tubo é dada pela equação 1.

$$\mathbf{a}_c(\mathbf{d}, \omega) = \omega^2 \mathbf{L}(\omega) e^{-jk\mathbf{d}}, \quad \text{equação (6)}$$

onde ω é a frequência em rad/s, $\mathbf{L}(\omega)$ é o espectro de vazamento, considerado ser ruído branco gaussiano (GAO, et al., 2004), \mathbf{d} é a distância do vazamento ao sensor (posição de medição), que pode ser \mathbf{d}_1 ou \mathbf{d}_2 , \mathbf{k} é o número de onda, e \mathbf{c} é a velocidade de propagação do ruído do vazamento ao longo do tubo. O número de onda é calculado de acordo com (BRENNAN, et al., 2018), onde sua parte real está relacionada à velocidade \mathbf{c} com que o ruído do vazamento se propaga ao longo do tubo, e sua parte imaginária diz respeito à atenuação do ruído do vazamento ao longo do tubo.

O número de onda do modelo utilizado pela bancada é descrito nos parágrafos seguintes. Este modelo é função das propriedades da água (módulo de compressibilidade \mathbf{B}_w), as propriedades do meio (módulo de compressibilidade complexo $\mathbf{B}_m^* = \mathbf{B}_m(1 + j\eta_d)$) e módulo de cisalhamento $\mathbf{G}_m^* = \mathbf{G}_m(1 + j\eta_s)$, sendo \mathbf{G}_m o módulo de armazenamento, η_s o fator de perda por cisalhamento, \mathbf{B}_m o módulo de compressibilidade e η_d o fator de perda por dilatação/compressão, e a geometria e propriedades do material do tubo (raio médio \mathbf{a} , espessura da parede \mathbf{b} , densidade ρ_p , e o módulo de Young complexo $\mathbf{E}_p^* = \mathbf{E}_p(1 - j\eta_p)$, sendo \mathbf{E}_p o módulo de elasticidade e η_p o fator de perda. Além disso, observa-se que a interação tubo-solo pode extrair energia de vazamento do tubo via uma onda dilatacional/compressional e uma onda de cisalhamento. Portanto, o modelo de número de onda deve considerar as propriedades mencionadas e os efeitos dessas duas ondas conforme definido por (BRENNAN, et al., 2018):



$$\mathbf{k} = \mathbf{k}_w \left(1 + \frac{\mathbf{K}_w}{\mathbf{K}_p + \mathbf{K}_m} \right)^{1/2}, \quad \text{equação (7)}$$

onde $\mathbf{k}_w = \omega / \mathbf{c}_w$ é o número de onda da água livre, $\mathbf{c}_w = 1500$ m/s é a velocidade do som na água, e $\mathbf{K}_w = 2\mathbf{B}_w / \mathbf{a}$, $\mathbf{K}_p = \mathbf{E}_p^* \mathbf{b} / \mathbf{a}^2 - \omega^2 \rho_p \mathbf{b}$ e $\mathbf{K}_m = \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_3$ são, respectivamente, as rigidezes dinâmicas da água, do tubo e do meio circundante (solo). Os termos para a rigidez do meio circundante são:

$$\mathbf{K}_1 = \left(\mathbf{B}_m^* - \frac{2\mathbf{G}_m^*}{3} \right) \frac{\mathbf{k}_d^2}{\mathbf{k}_d^r} \left(1 - 2 \frac{\mathbf{k}^2}{\mathbf{k}_d^r} \right) \frac{\mathbf{H}_0(\mathbf{k}_d^r \mathbf{a})}{\mathbf{H}'_0(\mathbf{k}_d^r \mathbf{a})}, \quad \text{equação (8)}$$

$$\mathbf{K}_2 = -2\mathbf{G}_m^* \mathbf{k}_d^r \left(1 + 2 \frac{\mathbf{k}^2}{\mathbf{k}_s^r} \right) \frac{\mathbf{H}'_1(\mathbf{K}_d^r \mathbf{a})}{\mathbf{H}_1(\mathbf{k}_d^r \mathbf{a})}, \quad \text{equação (9)}$$

$$\mathbf{K}_3 = -4\mathbf{G}_m^* \mathbf{k}_s^r \frac{\mathbf{k}^2}{\mathbf{k}_s^2} \frac{\mathbf{H}'_1(\mathbf{k}_s^r \mathbf{a})}{\mathbf{H}_1(\mathbf{k}_s^r \mathbf{a})}, \quad \text{equação (10)}$$

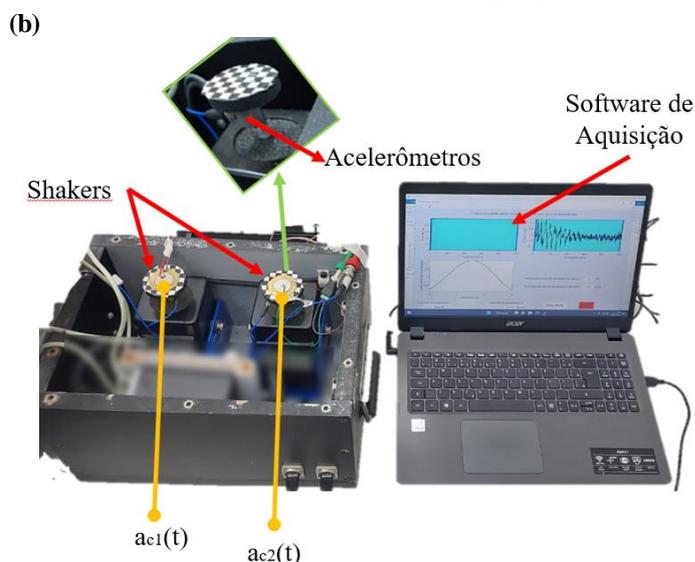
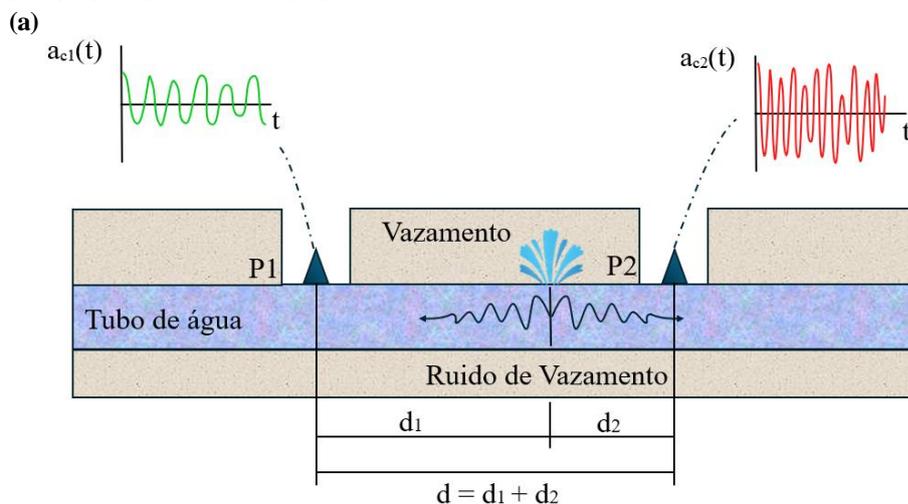
onde $\mathbf{H}_0(\bullet)$ e $\mathbf{H}_1(\bullet)$ são funções de Hankel de segunda espécie relacionadas às ondas cônicas que se irradiam pelo solo, e ' refere-se a uma derivada espacial; $\mathbf{k}_s^r = \sqrt{\mathbf{k}_s^2 - \mathbf{k}^2}$, onde $\mathbf{k}_d = \omega / \mathbf{c}_d$ é o número de onda de cisalhamento para o solo e $\mathbf{c}_s = \sqrt{\mathbf{G}_m^* / \rho_m}$ é a velocidade da onda correspondente; $\mathbf{k}_d^r = \sqrt{\mathbf{k}_d^2 - \mathbf{k}^2}$, em que $\mathbf{k}_d = \omega / \mathbf{c}_d$ é o número de onda compressional/dilatacional para o solo e $\mathbf{c}_d = \sqrt{(\mathbf{B}_m^* + 4\mathbf{G}_m^* / 3) / \rho_m}$ é a velocidade da onda correspondente. Portanto, a aceleração da resposta da parede do tubo devido a um vazamento é uma função dos parâmetros acima. O modelo descrito nesta seção é utilizado para replicar sinais de vazamento controlado em uma bancada de testes, de modo que seja possível acessar diferentes tipos de medições (de contato e não-contato) sob a mesma base. Esta bancada de testes é descrita na seção seguinte.

Se a velocidade do ruído do vazamento e as distâncias do vazamento aos sensores (\mathbf{d}_1 e \mathbf{d}_2) forem conhecidas antecipadamente, então o atraso de tempo \mathbf{t}_0 pode ser calculado pela equação equação (11), dessa mesma equação, se o atraso for conhecido, é possível encontrar uma das distâncias entre o sensor e o vazamento.

$$\mathbf{t}_0 = \frac{\mathbf{d}_1 - \mathbf{d}_2}{\mathbf{c}}. \quad \text{equação (11)}$$

O sistema completo da bancada de teste consiste em um computador, uma fonte de alimentação e o próprio dispositivo, conforme mostrado na figura 2(b). O computador hospeda o programa que gera os dados simulados conforme necessário. O dispositivo é composto por dois *shakers* para simular a vibração da parede do tubo devido a um vazamento. Placas rígidas são fixadas nos *shakers* para que acelerômetros possam ser conectados, conforme representado na figura 2(b). Esses sensores (acelerômetros) são usados para verificar se os sinais medidos são consistentes com os gerados pelo modelo, bem como, serão os sinais coletados via esses acelerômetros de alta sensibilidade compatíveis com aqueles encontrados em correlacionadores de ruído que serão comparados com os sinais de vibração extraídos dos vídeos da técnica aqui apresentada.

Figura 2: Bancada de Testes: a) Esquema da resposta do tubo devido à excitação pelo ruído de vazamento, modelo utilizado na bancada de testes; b) Configuração do sistema de teste com os atuadores (*shakers*) e sensores da bancada de testes.



Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados de alguns testes preliminares utilizando os parâmetros fornecidos na tabela 1 para a validação da bancada de teste estão apresentados na figura 3

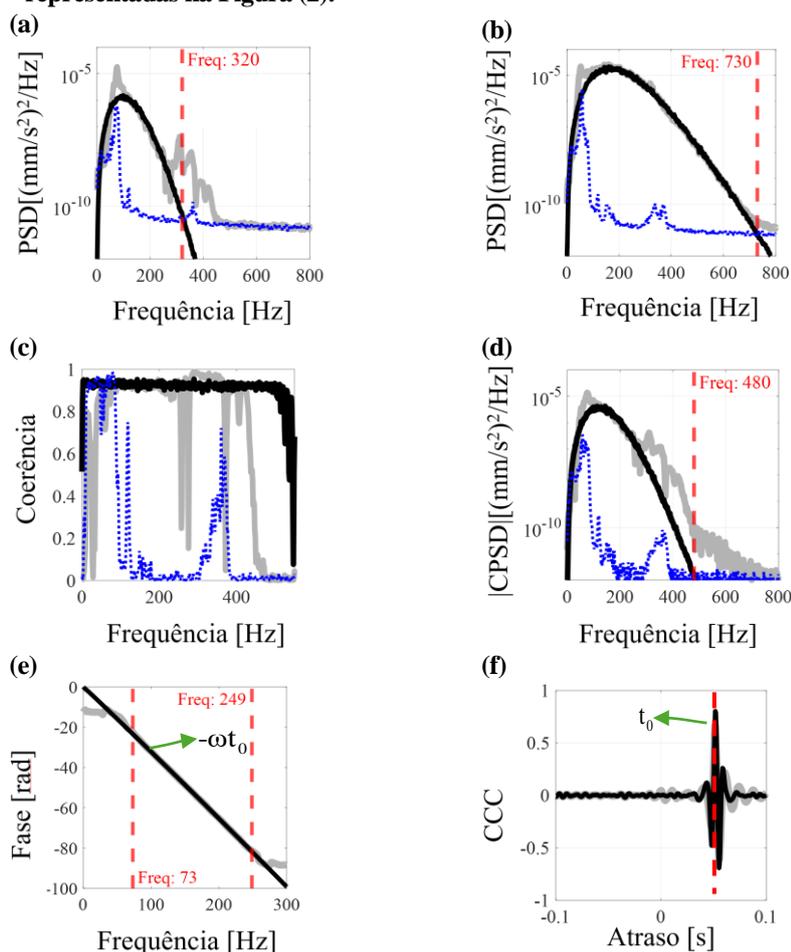
Tabela 1: Valores dos parâmetros usados na bancada para simulação de vazamento.

Parâmetros	Descrição
Solo	Arenoso
Material do tubo	PVC
Diâmetro do tubo	80 mm
Espessura da parede do tubo	9.85 mm
Distância sensor 1-vazamento(d_1)	50 m
Distância sensor 1-vazamento(d_2)	20 m
Velocidade de onda no tubo	550 m/s
Atraso de tempo esperado (t_0)	54.5 ms

As figuras 3(a) e 3(b) mostram as Densidades Espectrais de Potência (PSDs) correspondentes à posição 1 (P1 - mais distante do vazamento) e posição 2 (P2 - mais próxima do vazamento) para os dados sintetizados gerados pelo modelo (linha sólida preta) e as respostas dos *shakers* medidas pelos acelerômetros (linha sólida cinza), respectivamente. O ruído medido (do acelerômetro) com os *shakers* desligados também está representado para

conveniência (linha pontilhada azul) visando mostrar o ruído de instrumentação da bancada. A linha vertical pontilhada vermelha destaca o efeito de atenuação em cada posição. A coerência e o módulo da Densidade Espectral de Potência Cruzada (CPSD) são mostrados na figura 3(c) e 3(d), respectivamente. O gradiente de fase e o coeficiente de correlação cruzada (CCC), onde as informações de atraso de tempo estão contidas, são mostrados na figura 3(e) e 3(f), respectivamente. Observa-se que há uma boa concordância entre os dados sintetizados gerados pelo modelo e a resposta do atuador medida pelos acelerômetros tanto em amplitude quanto em fase (atraso de tempo). Portanto, o dispositivo de teste poderá ser usado para conduzir a investigação do uso de medidas sem contato usando uma câmera de alta velocidade.

Figura 3 - Condições simuladas sintetizadas usando o modelo (linha sólida preta) e a resposta do atuador medida pelos acelerômetros (linha sólida cinza) juntamente com o ruído de fundo (linha pontilhada azul). (a) PSD de P1; (b) PSD de P2; (c) Coerência entre P1 e P2; (d) Módulo da CPSD entre P1 e P2; (e) Fase da CPSD; (f) Coeficiente de correlação entre P1 e P2. A largura de banda de frequência sobre a qual o coeficiente de correlação cruzada é conduzido é representada na fase. As posições P1 e P2 estão representadas na Figura (2).



Fonte: Elaboração Própria.

ABORDAGEM DE VISÃO COMPUTACIONAL

Rastreamento de pontos

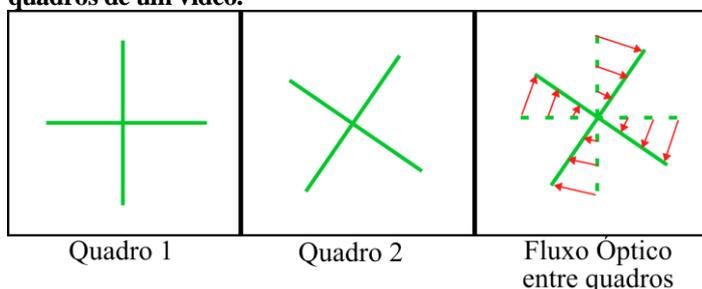
A visão computacional é um processo que visa analisar, modificar e fornecer uma compreensão de alto nível de imagens. Seu principal objetivo é capacitar os computadores a extrair características/informações significativas de imagens/vídeos comuns, como reconhecimento de padrões (XU, et al., 2021; ESTEVA, et al., 2021). O fluxo óptico (*optical flow*) é o padrão de movimento aparente de um objeto entre dois quadros de vídeo. Supondo que a intensidade dos pixels que representam um objeto em uma imagem não varie de quadro para quadro durante o movimento, é possível definir que $I_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t})$ é a intensidade de um pixel no primeiro quadro, onde (\mathbf{x}, \mathbf{y}) é sua posição, (\mathbf{t}) é o tempo correspondente ao quadro, e $I_2(\mathbf{x} + d\mathbf{x}, \mathbf{y} + d\mathbf{y}, \mathbf{t} + d\mathbf{t})$ é o mesmo pixel no próximo quadro de vídeo. A suposição de intensidade constante leva a $I_1 = I_2$ (XU, et al., 2021; ESTEVA, et al., 2021) Essa suposição é a base para a equação de definição de gradiente do fluxo óptico dada por (MACIEL, et al., 2020) e mostrada na equação 3.

$$\mathbf{f}_x \mathbf{u} + \mathbf{f}_y \mathbf{v} + \mathbf{f}_t = 0 \quad \text{equação (12)}$$

Nesta formulação, $\mathbf{u} = d\mathbf{x} / d\mathbf{t}$ e $\mathbf{v} = d\mathbf{y} / d\mathbf{t}$ são as velocidades com que o ponto rastreado, representado por um pixel, se move entre quadros nas direções x e y , respectivamente; $\mathbf{f}_x = \partial I / \partial x$ e $\mathbf{f}_y = \partial I / \partial y$ são os gradientes de intensidade da imagem nas direções x e y , respectivamente, e $\mathbf{f}_t = \partial I / \partial t$ é o gradiente temporal; \mathbf{f}_x , \mathbf{f}_y e \mathbf{f}_t são informações intrínsecas da imagem que podem ser extraídas ou estimadas diretamente de um ou dois quadros em sequência. No entanto, os valores de \mathbf{u} e \mathbf{v} não estão definidos, portanto a equação (3) é indeterminada.

Existem diferentes técnicas para resolver a equação 3 (FORTUN, et al., 2015; BARRON, et al., 1994). Uma das mais precisas e que demandam menos tempo é chamada de método de Lucas-Kanade (BARRON, et al., 1994). Neste método, o ponto de rastreamento está associado a uma área quadrada de pelo menos 3 por 3 pixels, que é chamada de matriz de função de janela. Ao assumir movimentos semelhantes dos pixels vizinhos, 9 equações de definição de gradiente (matriz 3 por 3) são fornecidas para determinar \mathbf{u} e \mathbf{v} resolvendo esse sistema usando o método dos mínimos quadrados (BARRON, et al., 1994). Com isso, esse procedimento estima a direção e a velocidade de um ponto móvel entre quadros. A velocidade é dada em unidades de pixels/quadro, portanto, o deslocamento entre 2 quadros é dado pela própria velocidade calculada para esses respectivos quadros. A conversão de pixels/quadro para mm/s pode ser feita usando a resolução espacial do vídeo (mm/pixel) e a taxa de quadros (quadros/s). A Figura (4) ilustra a indicação do fluxo óptico para diferentes quadros de um vídeo em sequência.

Figura 4 - Ilustração do fluxo óptico (setas vermelhas) de alguns pontos sobre uma superfície para sucessivos quadros de um vídeo.



Fonte: Elaboração Própria.

A variação da intensidade do pixel no tempo ou no espaço é a principal característica utilizada para detectar, filtrar e reconhecer objetos em uma imagem. Quando essas mudanças de intensidade ocorrem no espaço sobre uma imagem, as taxas associadas são chamadas de gradientes espaciais, onde esses gradientes apresentam amplitudes mais altas, mudanças mais abruptas, geralmente são regiões da imagem onde estão localizadas as bordas e quinas. O operador Sobel é uma maneira de detectar essas regiões de alto gradiente e usá-las como boas características a serem rastreadas em um vídeo (NIXON, et al., 2012). Essa técnica é usada juntamente com o método de Lucas-Kanade para rastrear um ponto em uma superfície específica (nesse caso, a vibração do agitador).

EXPERIMENTO

Equipamento utilizado

Assim como diferentes sensores de contato com diferentes respostas em frequência distintas e/ou ruídos de instrumentação podem obter medições com qualidades distintas, o uso de diferentes câmeras, mesmo com a mesma resolução, podem também obter qualidade de sinal distintos acarretando em mudanças drásticas nos resultados obtidos. Para melhor compreensão desses efeitos, foi realizado um teste onde uma câmera Sony RX100 IV foi colocada em comparação a uma Basler Ace2 a2A1920-160umBAS. Ressalta-se que ambas as câmeras são de mesma faixa de preço, e capazes de gravar em relativamente altas taxas de aquisição. A resolução das duas câmeras é praticamente a mesma, ou seja, os dois *shakers* estavam dentro de uma área de 1900×150 pixels de medição, mas existem algumas diferenças cruciais entre as câmeras, como por exemplo os sensores internos e lentes diferentes. A Sony possui um sensor de cor e a Basler possui um sensor monocromático (escala de cinza), o que é importante porque as câmeras coloridas podem capturar apenas uma cor por pixel, através do uso de alguns filtros de luz, e as outras cores são interpoladas usando as informações dos pixels vizinhos que capturaram essas cores, um processo chamado *Demosaicing* (LOSSON, et al., 2010). Por outro lado, sensores monocromáticos capturam toda a luz em todos os pixels e a interpretam em escala de cinza o que permite uma melhor definição da imagem e contrastes mais altos. A diferença no tipo e qualidade do sensor da câmera também afetará o nível de ruído de instrumentação capturado por cada câmera.

As câmeras gravaram a bancada de testes executando um sinal de deslocamento aleatório com um atraso de 0,1 segundos entre os *shakers*. Ambas as câmeras foram posicionadas a cerca de 50 cm da bancada de testes e com um ângulo de 15° em relação às superfícies dos *shakers*, que estavam cobertas com uma lixa grossa, para simular asfalto e giz branco para gerar contraste. A câmera Sony gravou a 960 quadros por segundo e a Basler gravou a 800 quadros por segundo. Os quadros de vídeo podem ser vistos na figura 5 e os resultados do processamento do sinal dos dados gravados podem ser vistos na figura 6.

Figura 5 - Quadros dos vídeos. (a) Sony RX100 IV e (b) Basler ace 2 a2A1920-160umBAS

(a)



(b)

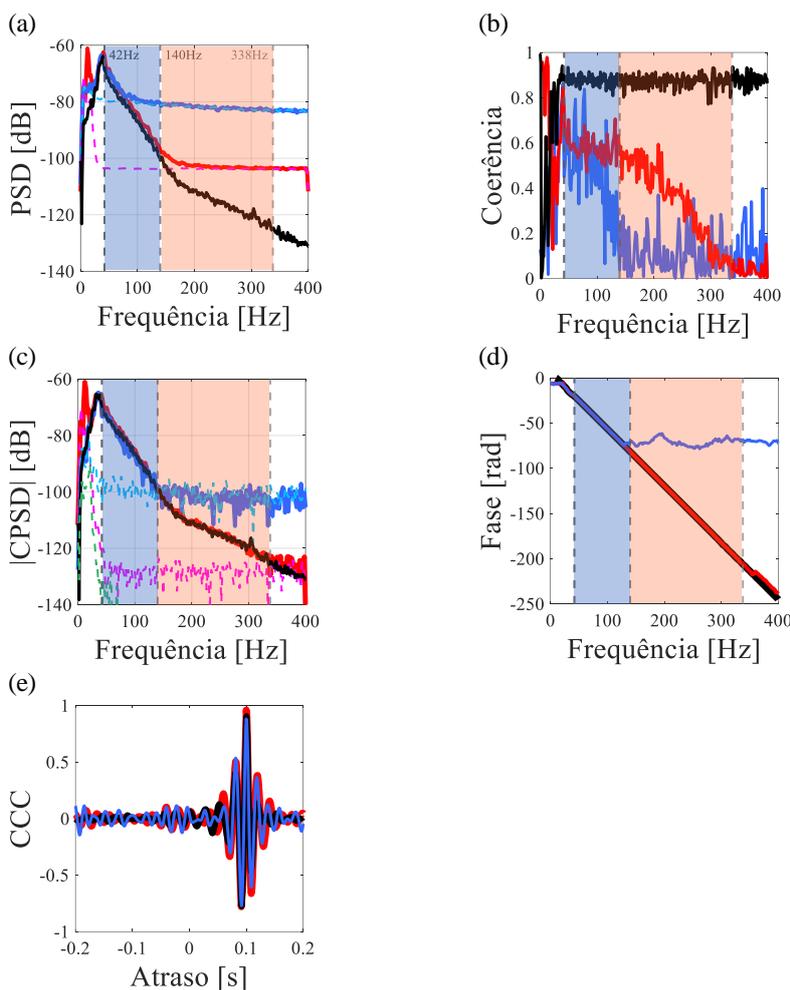


Fonte: Elaboração Própria.

Na figura 5 é possível observar já uma diferença entre os resultados gerados por cada câmera. Um quadro da câmera Sony é mostrada na Figura 5(a) onde é possível observar uma menor nitidez e um menor contraste dos tons claros e escuros em comparação com câmera Basler, cujo quadro é mostrado na Figura 5(b). Processamento de sinais clássico é utilizado para caracterizar cada uma das câmeras, bem como, comparar seu resultado com o acelerômetro de alta sensibilidade montado na bancada. Na figura 6(a) são mostrados os PSDs da câmera Sony (linha azul), da câmera Basler (linha vermelha) e do acelerômetro de alta sensibilidade (linha preta). É possível ver uma grande diminuição no ruído de fundo usando a câmera Basler (PSD da câmera Basler se aproxima com os níveis do acelerômetro até uma frequência em torno de 140Hz, ou seja fornece uma boa correspondência com os dados do acelerômetro até próximo ao final da largura de banda analisada. Essa melhoria também pode ser vista na coerência mostrada na figura 6(b). Ressalta-se que a coerência, CPSD e CCC são calculadas utilizando dois sensores. No caso das câmeras, um vídeo contendo os dois atuadores da bancada (*shakers*) são utilizados e os dados extraídos de cada base de cada atuador realizados. A melhor coerência é obtida para o acelerômetro (linha preta), enquanto a Basler (linha vermelha) apresenta a melhor coerência entre as câmeras (Sony representada pela linha azul). Similar resultado por ser observado via CPSD mostrada na Figura 6(c). Nota-se, entretanto, que a fase da câmera Basler quando comparada com a fase obtida pelos acelerômetros possuem comportamento linear em quase toda faixa de frequência mostrada no gráfico, o que não é o caso para a câmera Sony (padrão de cor utilizado é o mesmo da que já apresentado para a coerência é módulo da CPSD). Essa análise mostra a superioridade da Basler em relação a câmera Sony, bem como, quão robusta é a fase quando comparada as outras ferramentas de análise de sinais, sendo mais robusta ao ruído como mencionado anteriormente. O aumento da largura de banda com maior coerência e fase linear desempacotada é uma evidência robusta de superioridade da Basler em relação à Sony. A figura 6(e) mostra

que os sinais provenientes de ambas as câmeras contém o atraso de tempo entre os sinais sendo o pico da correlação cruzada para as câmeras e acelerômetros próximas a 1, evidenciando a energia equivalente dos sinais entre os dois sensores (ou das respostas dos dois atuadores da bancada).

Figura 6 - Resultados da comparação das câmeras, (a) PSDs dos sinais dos *shakers* gravados com a câmera Basler (vermelho), com a câmera Sony (azul), respectivos ruídos de fundo (rosa e azul claro) e resposta do acelerômetro (preto) com a largura de banda útil para cada câmera delimitada. (b) As coerências entre os sinais dos *shakers* gravados com a câmera Basler, com a câmera Sony e o acelerômetro. (c) CPSDs dos sinais dos *shakers* gravados com a câmera Basler, com a câmera Sony, respectivos ruídos de fundo, e do acelerômetro. (d) Fase desembrulhada entre os sinais dos *shakers* gravados com a câmera Basler, com a câmera Sony e o acelerômetro. (e) Coeficiente de Correlação Cruzada dos sinais dos *shakers* gravados com a câmera Basler, com a câmera Sony e o acelerômetro.



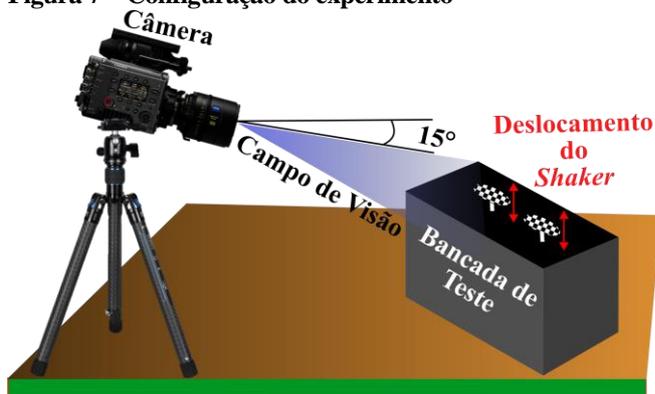
Fonte: Elaboração Própria.

Configuração e extração de dados

O mesmo procedimento adotado na seção de teste da bancada foi utilizado para este experimento, mas nesse caso o sinal utilizado foi um que representa um vazamento real em um tubo existente, ou seja, diferente atenuação dos sinais entre os dois pontos de medida. A simulação foi realizada utilizando os parâmetros fornecidos na tabela 1. As placas dos *shakers* da bancada foram cobertas com um adesivo apresentando um padrão de tabuleiro de xadrez para aumentar o contraste e facilitar o processo de rastreamento de pontos do vídeo. Vídeos de um minuto foram gravados usando uma câmera de alta velocidade a 50 cm de distância dos *shakers* a um ângulo de 15° em relação as superfícies das placas. A Figura 7 mostra um esquema da configuração do teste. Os vídeos foram gravados usando uma câmera BASLER a2A1920-160umBAS a uma taxa de 1000 quadros por segundo, com uma resolução espacial

de 0,06 mm/px. Os sinais produzidos pelos agitadores também foram registrados usando acelerômetros PCB 333B40 fixados sob cada placa nos *shakers*.

Figura 7 – Configuração do experimento



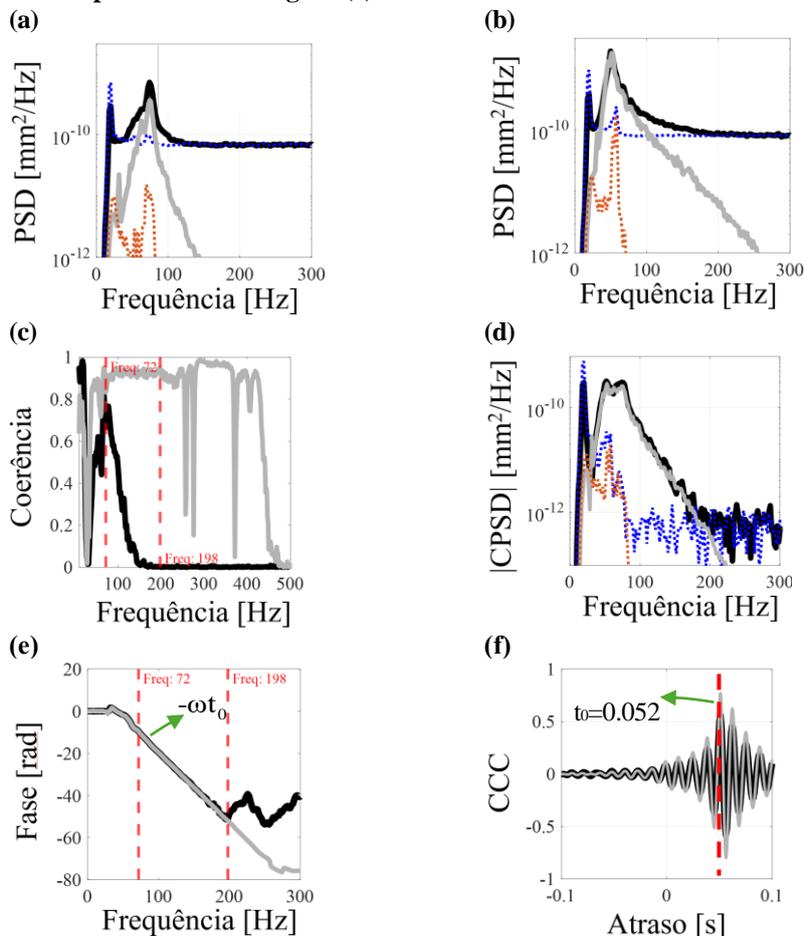
Fonte: Elaboração Própria.

Foram realizados dois vídeos (medições): um para medir o ruído de fundo (*shakers* desligados) e outro com o dispositivo produzindo os sinais de vazamento conforme descrito na seção que descreve a bancada. O vídeo resultante foi processado usando o operador Sobel para identificar os melhores pontos a serem rastreados, que geralmente são os cantos do padrão de tabuleiro de xadrez. O método de fluxo óptico foi usado para rastrear o deslocamento, em pixels, dos pontos selecionados. A posição de cada ponto em cada quadro foi então obtida como função do tempo. A investigação dos sinais resultantes como na seção anterior foi repetida e é descrita na próxima subseção para verificar a viabilidade de medir a vibração do tubo devido à excitação do tipo vazamento.

Análise dos dados e comparação com sensores de contato

É importante observar que a extração de deslocamento dos vídeos é dada em pixels, mas a resposta medida via acelerômetros é dada em m/s^2 . Uma comparação deve ser feita usando as mesmas unidades. Portanto, os dados do acelerômetro do simulador de vazamento foram integrados duas vezes e multiplicados por 1000 para converter esse sinal de aceleração em deslocamento em milímetros. Para o vídeo, no entanto, os sinais da câmera foram multiplicados pela resolução espacial, de modo que a unidade do sinal foi convertida de pixels para milímetros. As medições processadas são apresentadas na figura 8. As figuras 8(a) e (b) mostram as PSDs correspondentes aos pontos P1 e P2, respectivamente. As cores das linhas seguem o mesmo padrão usado na figura 3. Observa-se que o ruído de instrumentação da câmera é muito maior do que o ruído de instrumentação do acelerômetro. A limitação prática é que o acelerômetro pode medir níveis de vibração muito menores do que a câmera. A coerência, o módulo e a fase da CPSD são representados nas figuras 8(c), 8(d) e 8(f), respectivamente. Pode-se observar que a coerência dos dados medidos usando a câmera é muito mais estreita do que para os dados coletados usando o acelerômetro. Isso demonstra que a limitação para a câmera é o ruído de instrumentação (MUGGLETON, et al., 2011). Isso afeta a largura de banda sobre a qual a fase pode ser desembrilhada, como destacado na figura 8(f). O CCC representado na figura 8(f) é maior para a medição de aceleração do que para a medição da câmera. Embora a largura de banda de frequência seja a mesma para ambas as medições, os dados da câmera têm um conteúdo de alta frequência, que está mais próximo do ruído do instrumento, e isso afeta diretamente o CCC. No entanto, em termos gerais, o atraso de tempo é bem estimado usando a câmera, como mostra a figura 8(f) comparando com o acelerômetro. Possuindo o atraso entre pontos de medida correto, é possível encontrar a posição correta do vazamento utilizando a equação 2 descrita anteriormente.

Figura 8 - Comparação entre as medições realizadas usando a câmera (linha sólida preta) e os acelerômetros (linha sólida cinza). O ruído instrumental da câmera (linha pontilhada azul) e o ruído instrumental do acelerômetro (linha tracejada laranja) estão representados para conveniência: (a) PSDs em P1; (b) PSDs em P2; (c) Coerência entre P1 e P2; (d) Módulo dos CPSDs; (e) Fase dos CPSDs; (f) CCC. As posições P1 e P2 estão representadas na Figura (2).



Fonte: Elaboração Própria.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma investigação inicial sobre o uso de uma câmera como uma maneira alternativa de medir a vibração em tubulações de água geradas pelo ruído de vazamento usando medições não invasivas. O principal objetivo desta investigação foi extrair informações de deslocamento contidas em vídeos comuns capturados a partir da superfície do solo diretamente acima da tubulação ou outros pontos de medição específicos (cavaletes e hidrantes) para auxiliar na detecção e localização de vazamentos em tubulações enterradas. Portanto, qualquer ponto contendo a resposta vibratória da tubulação presente em um vídeo poderia ser usado para este propósito, o que por sua vez é semelhante a um conjunto de sensores com a vantagem de usar apenas um sensor (câmera). Ressalta-se que todas as medições foram realizadas utilizando uma bancada experimental onde sinais de vazamento sintetizados podem ser reproduzidos de maneira fidedigna. Para um melhor entendimento da técnica de extração de dados de movimento contidos em vídeos, foi realizado uma introdução ao método de visão computacional de rastreamento de pontos em vídeo, destacando o método Lucas-Kanade e o operador Sobel, que são a base da técnica usada neste artigo. Um simulador de ruído de vazamento (bancada de teste) foi usado para investigar a técnica da câmera em testes controlados de laboratório. Primeiramente duas câmeras são colocadas em comparação mostrando a importância do uso de dispositivos de maior sensibilidade e qualidade. Em seguida, a resposta simulada da parede do tubo à excitação do vazamento foi usada, de modo que o atraso de tempo e a atenuação do sinal pudessem ser alcançados de forma repetitiva e representativa. A vibração medida utilizando a câmera foi processada e analisada através de métodos como PSDs, módulo e fase dos CPSDs, coerência e CCC, e por fim, comparadas com os dados medidos por acelerômetros.



Os resultados mostram que o uso da câmera e das técnicas associadas de visão computacional para estimar informações de atraso de tempo é promissor. A técnica da câmera foi capaz de rastrear os sinais de deslocamento produzidos pelo simulador de vazamento e pôde estimar a largura de banda de frequência sobre a qual a fase pode ser calculada. O atraso de tempo estimado dentro desta faixa de frequência foi comparado ao calculado usando os dados de acelerômetro de alta sensibilidade montados na bancada e usados como referência. Embora o pico no CCC calculado a partir dos dados da câmera fosse menor, o atraso de tempo estimado foi o mesmo que para os dados de aceleração, logo a mesma posição teórica de vazamento foi encontrada. Além disso, o ruído de instrumentação presente nos dados medidos coletados pela câmera impõe limitações, especialmente em frequências mais altas, mas não é tão problemático pois sinais de vazamento em tubos de plástico são atenuados em frequências altas. Portanto, o uso da técnica da câmera é limitado a sinais de conteúdo de baixa frequência, sendo talvez uma técnica promissora a tubos com grandes diâmetros como aqueles encontrados em adutoras. Para a melhora da banda de frequência, entretanto, pode ser utilizado um sistema de iluminação otimizado/melhorado para reduzir o ruído de extração do vídeo e/ou aplicando câmeras com maior resolução e taxa de amostragem, pois pixels menores são mais sensíveis a pequenos deslocamentos.

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer o apoio financeiro fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) sob os números de concessão 2020/12251-1 e 2022/07586-0, pela CAPES sob o número de concessão 432272/2018-6, pela empresa de água SABESP. Este resultado reflete apenas a visão dos autores, o Governo do Estado de São Paulo não são responsáveis por qualquer uso que possa ser feito das informações que ele contém.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALKASSEH, J.M.A. *Applying minimum night flow to estimate water loss using statistical modeling: A case study in Kinta Valley, Malaysia. Water resources management* 27(5) 1439-1455. 2013.
2. ALMEIDA, F.C.L., BRENNAN, M.J., JOSEPH, P.F., WITHFIELD, S., DRAY, S., PASCOALLINI, A.T. *On the Acoustic Filtering of the Pipe and Sensor in a Buried Plastic Water Pipe and its Effect on Leak Detection: An Experimental Investigation. Sensors (Basel)*, v. 14, p. 5595-5610. 2014.
3. BARRON, J.L., FLEET, D.J., BEAUCHEMIN, S.S. *Performance of optical flow techniques. International journal of computer vision*, 12, 43-77. 1994.
4. BENDAT, J.S., PIERSOL, A.G. *Random data: analysis and measurement procedures*. 4th ed., John Wiley & Sons, 2010.
5. BRENNAN, M. J. ; ALMEIDA, F. C. L. ; IWANAGA, M. K. ; SCUSSEL, O. *Método e Bancada de Simulação de Sinais de Vazamento em Duto*. 2019, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020190280263, Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 27/12/2019
6. BRENNAN, M.J., KARIMI, M., MUGGLETON, J.M., ALMEIDA, F.C.L., LIMA, F.K., AYALA, P.C., OBATA, D.H., PASCHOALINI, A.T., KESSISSOGLU, N. *On the effects of soil properties on leak noise propagation in plastic water distribution pipes. Journal of Sound and Vibration*, Vol. 427, pp. 120 – 133. 2018.
7. CASADO, P.M., RUSTIGHI, E., FONTANARI, V., MUGGLETON, J. *Preliminary Numerical Simulation for the Development of a Seismic Camera*. In *Recent Trends in Wave Mechanics and Vibrations: Proceedings of WMVC 2022*. (pp. 1085-1095). Cham: Springer International Publishing. 2023.
8. CHEN, J.G., DAVIS, A., WADHWA, N., DURAND, F., FREEMAN, W.T., BÜYÜKÖZTÜRK, O. *Video camera-based vibration measurement for civil infrastructure applications. Journal of*

- Infrastructure Systems*, 23(3), B4016013. 2017.
9. ESTEVA, A., CHOU, K., YEUNG, S., NAIK, N., MADANI, A., MOTTAGHI, A., LIU, Y., TOPOL, E., DEAN, J., SOCHER, R. *Deep learning-enabled medical computer vision. NPJ digital medicine*, 4(1), 5. 2021.
 10. FORTUN, D., BOUTHEMY, P., KERVRANN, C. *Optical flow modeling and computation: A survey. Computer Vision and Image Understanding*, 134, 1-21. 2015.
 11. GAO, Y., BRENNAN, M.J., MUGGLETON, J.M., HUNAIDI, O. *A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes, Journal of Sound and Vibration*, Vol. 277, pp. 133-148. 2004.
 12. HUNAIDI, O., CHU, W., WANG, A., GUAN, W. *Detecting leaks in plastic pipes. Journal-American Water Works Association*, 92(2), 82-94. 2000.
 13. IWANAGA, M.K., BRENNAN, M.J., ALMEIDA, F.C.L., SCUSSEL, O., CEZAR, S.O. *A laboratory-based leak noise simulator for buried water pipes. Applied Acoustics*, 185, 108346. 2022a.
 14. IWANAGA, M.K., BRENNAN, M.J., SCUSSEL, O., ALMEIDA, F.C.L., KARIMI, M. *On the Pipe Localization Based on the Unwrapped Phase of Ground Surface Vibration Between a Roving Pair of Sensors. Recent Trends in Wave Mechanics and Vibrations: Proceedings of WMVC 2022* (pp. 1069-1076). Cham: Springer International Publishing. 2022b.
 15. JAVH, J., SLAVIČ, J., BOLTEŽAR, M. *Experimental modal analysis on full-field DSLR camera footage using spectral optical flow imaging. Journal of Sound and Vibration*, 434, 213-220. 2018.
 16. KILINSKI, M.A. *Overview of Leak Detection Technologies A Summary of Capabilities and Costs. Pacific Northwest National Lab Report, PNNL-28885*, 2019. 2019.
 17. LOSSON, O., LUDOVIC, M., YANQIN, Y. *Comparison of color demosaicing methods. Advances in Imaging and electron Physics*. Vol. 162. Elsevier, 173-265. 2010.
 18. MACIEL, L.M.S., VIEIRA, M.B. *Sparse Optical Flow Computation Using Wave Equation-Based Energy. International Journal of Image and Graphics*, 20(04), 2050027. 2020.
 19. MUGGLETON, J.M., BRENNAN, M.J., GAO, Y. *Determining the location of buried plastic water pipes from measurements of ground surface vibration. Journal of Applied Geophysics*, 75(1), 54-61. 2011.
 20. NIXON, M.S., AGUADO, A.S. *Chapter 4—Low-level feature extraction (including edge detection). Feature Extraction & Image Processing for Computer Vision*, 3rd ed.; Nixon, MS, Aguado, AS, Eds, 137-216. 2012.
 21. PRATICO, L., GALOS, J., CESTINO, E., FRULLA, G., MARZOCCA, P. *Experimental and numerical vibration analysis of plates with curvilinear sub-stiffeners. Engineering Structures*, 209, 109956. 2020.
 22. RIBEIRO, A.P. *O Século da Escassez. O Globo* (Printed Issue 24/03/2018, p.8). 2018.
 23. ROYAL, A.C.D., et al. *Site Assessment of multiple-sensor approaches for buried utility detection International Journal of Geophysics*. 2011.
 24. SHAKMAK, B., AL-HABAIBEH, A. *Detection of water leakage in buried pipes using infrared technology; A comparative study of using high and low resolution infrared cameras for evaluating distant remote detection. 2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)* (pp. 1-7). IEEE. 2015.
 25. XU, S., WANG, J., SHOU, W., NGO, T., SADICK, A.M., WANG, X. *Computer vision techniques in construction: a critical review. Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, 3383-3397. 2021.



26. YUSSOF, N.A.M., HO, H.W. *Review of Water Leak Detection Methods in Smart Building Applications. Buildings*, 12(10), 1535. 2022.
27. ZAMAN, D., TIWARI, M.K., GUPTA, A.K., SEN, D. *A review of leakage detection strategies for pressurised pipeline in steady-state. Engineering Failure Analysis*, 109, 104264. 2020.