

Estudo Experimental em Plataforma de Petróleo Offshore para o Desenvolvimento de Solução de Detecção Acústica de Vazamento de Gás

Edson Pereira de Castilho Junior, Fabrício Braga S. de Carvalho e Waslon Terlizzie A. Lopes

Resumo— Uma nova técnica relacionada ao método acústico de detecção de vazamentos de gás em plataformas de petróleo offshore é proposta. Experimentos realizados neste ambiente com gravação sonora do evento de vazamento mostram que a utilização das componentes do sinal na banda de espectro de som audível, associado ao pré-processamento e extração de características, é viável como fonte para o desenvolvimento de soluções de detecção autônoma baseadas em Aprendizado de Máquina. Este trabalho apresenta extratores de características do sinal sonoro sensíveis ao fenômeno do vazamento com clara indicação do acontecimento de um evento desta natureza.

Palavras-Chave— Vazamento de Gás; Plataformas de Petróleo Offshore; Método Acústico; Extração de Características.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a descoberta e desenvolvimento das reservas petrolíferas no pré-sal associados à elevação dos preços internacionais das *commodities* impulsionaram investimentos no setor de óleo e gás no Brasil. Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a produção média diária em 2022 de petróleo e gás natural foram de 3.021.000 barris e 138.000.000 m³, respectivamente [1].

Os investimentos nestas novas fronteiras trazem consigo maiores desafios à segurança operacional. Os altos níveis de vazão e pressão aumentam os riscos de eventos emergenciais relacionados à perda de contenção (vazamentos) de hidrocarbonetos. Grandes desastres da indústria petroquímica se iniciaram a partir da liberação inadvertida do produto químico processado. Exemplo disso se deu no acidente ocorrido em 1988 com a plataforma Piper Alpha, localizada na Grã-Bretanha, que matou 226 trabalhadores e levou a um prejuízo material de 2,088 bilhões de dólares [2].

Os vazamentos de gás nas instalações offshore são tipificados, de acordo com o *International Regulators' Forum* (IRF), como Significativo (do inglês *Significant*) ou Grande (do inglês *Major*) [3]. No Brasil, em 2022, o número de liberações do tipo *Significant* e *Major* por 100 milhões de barris de óleo equivalente de gás produzidos foram 1,95 e 1,17, nesta ordem [4]. Isto revela um desempenho entre 1,95 e 8,35 vezes inferior em relação a referência internacional estabelecida pelo IRF para os vazamentos do tipo *Significant* e *Major*, respectivamente.

Edson Pereira de Castilho Junior, Departamento de Engenharia Elétrica, UFPB, João Pessoa-PB, e-mail: edson.castilho@cear.ufpb.br; Fabrício Braga S. de Carvalho, Departamento de Engenharia Elétrica, UFPB, João Pessoa-PB, e-mail: fabricio@cear.ufpb.br, e Waslon Terlizzie A. Lopes, Departamento de Engenharia Elétrica, UFPB, João Pessoa-PB, e-mail: waslon@cear.ufpb.br

Posto isto, exige-se no Brasil um maior esforço na implementação e manutenção da confiabilidade dos sistema de monitoramento e detecção de vazamentos de gás autônomos em plataformas de petróleo offshore por questões econômicas e de segurança. Contudo, atualmente, estes sistemas apresentam uma insuficiente taxa de detecção autônoma. A partir dos dados da *Health and Safety Executive* (HSE), contendo registros de vazamento entre 1992-2016, a taxa de detecção autônoma da liberação do tipo Maior foi de 73%, enquanto esta taxa para vazamentos do tipo Significante caiu para 42% [5].

Atualmente, a filosofia de detecção autônoma mais adotada baseia-se na utilização de sensores de gás infravermelhos do tipo pontual e visada ao longo da planta de processamento. Este tipo de tecnologia depende da formação de nuvem de gás a uma concentração mínima dentro de um volume espacial coberto pelo instrumento. Muitas vezes, devido a condições climáticas adversas como alta velocidade do vento, excesso de precipitações atmosféricas ou mesmo a alta aglomeração de equipamentos e outros aparatos nos módulos de processamento, esta detecção é prejudicada levando a situações em que o vazamento de gás não é detectado autonomamente. Não rara são os eventos em que a liberação gasosa é detectada por operadores em suas rondas diárias, usando basicamente seus sentidos de visão, audição e olfato.

Outros métodos de detecção são amplamente aplicadas na indústria petroquímica, cada uma ajustada às condições específicas da instalação. São exemplos destes o método acústico, as técnicas de detecção fotoacústica, o perfilamento de temperatura, o radar de penetração no solo, sensores químicos entre outros [6], [7].

As técnicas atualmente estudadas sob à ótica do método acústico focam nas componentes ultrassônicas do sinal propagadas a partir de um evento de perda de contenção [6], [7], [8]. Soluções com capacidade de leitura ultrassônica são comercializadas com este propósito, servindo como barreira de detecção autônoma adicional às atualmente instaladas na indústria química [12]. Por outro lado, implementação de soluções como esta em ambientes com alta aglomeração de equipamentos levantam ressalvas importantes que podem levar a uma baixa eficácia de detecção de vazamentos [6]. Ademais, a gravação ultrassônica exige a utilização de microfones pouco comuns em equipamentos de uso geral como dispositivos eletrônicos usados com outros propósitos na indústria (*e.g. Tablets, PDAs - Personal Digital Assistance*).

Posto isto, o presente trabalho foca no desenvolvimento das etapas de pré-processamento e extração de características de

componentes sonoras do espectro audível a fim de servir como entrada para um desenvolvimento futuro da etapa de classificação baseada em Aprendizado de Máquina. O processo de extração de características que revelam nuances do evento que busca-se classificar é dos mais vitais para o desenvolvimento de algoritmos baseado em Aprendizado de Máquina [13], [14].

O restante do trabalho é organizado conforme a seguir. Na Seção II são expostos fundamentos físicos do vazamento enquanto fonte de sinal sonoro, sua propagação e trabalhos mais relevantes de detecção autônoma de vazamentos por métodos acústicos. Na Seção III são apresentados os detalhes do estudo experimental realizado em plataforma de petróleo *offshore* e a análise em frequência das componentes do sinal sonoro amostrado. A Seção IV apresenta a estrutura básica do sistema de detecção sonora baseada em aprendizado de máquina e os resultados obtidos até então visando a completação deste sistema e sinalizando os caminhos futuros da pesquisa.

II. A ACÚSTICA DO VAZAMENTO E TRABALHOS RELACIONADOS

A. O Som Gerado pelo Vazamento

A partir dos fenômenos de ejeção de gás, pulsação de pressão e alta velocidade em jato oriundo de uma ocorrência de vazamento, um som aerodinâmico turbulento é gerado. O estudo deste fenômeno de ruído induzido por fluxo é facilitado pelas teorias de analogia acústica estudadas pioneiramente por Lighthill [9].

Com base na teoria geral de sons gerados aerodinamicamente, desenvolvido por M. J. Lighthill [9], a potência acústica é dada por

$$P_a = \frac{Kl^2\rho_0U^8}{a^5} \quad (1)$$

onde l é o diâmetro do orifício do vazamento; P_a é a potência acústica; U é a velocidade de escoamento do fluido gasoso no furo; ρ_0 é a densidade do gás vazado; a é a velocidade do som no local, $a = 20,5\sqrt{T}$, onde T é a temperatura em kelvin, e K é a constante de Lighthill, $K = 3 \times 10^{-5}$.

A Equação 1 mostra que a potência acústica são dependentes do tamanho do orifício e da velocidade de escoamento

B. Propagação Acústica

Após a geração de potência acústica, este som se propaga pelo meio interno e externo. No que tange a propagação através do meio interno, o sinal acústico, mais precisamente suas componentes de baixa frequência, se propagam pelo gás confinado ao meio interno da tubulação por longas distâncias, no sentido a montante e a jusante do furo. Aproveitando-se desta característica algumas técnicas de detecção acústica usam transdutores não intrusivos, encostados na superfície externa da tubulação, para a captura deste sinal [6], [7], [8]. Esta técnica baseada no método acústico tem como principal vantagem a possibilidade de detectar e localizar vazamentos em dutos a longas distâncias. Contudo, o método não é adequado para detecção de pequenos vazamentos ou para fluidos com alto coeficiente elástico, viscosidade, ou densidade. Ademais, este método assume como pré-requisito a ausência

de fontes passivas como compressores, bombas e obstruções, não sendo conveniente, portanto, para a necessidade buscada no trabalho [6].

A propagação para o ambiente externo segue uma dinâmica diferente daquela vista na propagação interna. Conforme trazido por [11], dentro da banda de som audível, a intensidade sonora de um vazamento é muito menor do que a do ruído ambiental. Isto se inverte para frequências ultrassônicas, ou seja, para componentes maiores que 20 kHz a intensidade do vazamento é maior que o ruído do ambiente. Usando esta propriedade, soluções de detecção de vazamentos propagados por este meio usam preponderantemente detectores ultrassônicos para captura do sinal acústico gerado no evento [6], [7].

Por outra perspectiva, as ondas ultrassônicas tem uma propriedade altamente direcional e seu uso pode ser prejudicado em ambientes com alta concentração de equipamentos e apetrechos [5], sendo esta a realidade encontrada nas plataformas petrolíferas.

A técnica de detecção de vazamentos pela amostragem e processamento das componentes acústicas dentro da banda espectral de som audível, ou seja, entre 20 Hz e 20 kHz, aparentemente não é explorada pelas soluções existentes e trabalhos científicos pesquisados. Isto abre oportunidades para o estudo e desenvolvimento de soluções por este caminho.

III. ESTUDO EXPERIMENTAL DE VAZAMENTO EM PLATAFORMA DE PETRÓLEO *Offshore*

Com o objetivo de entender a nuances existentes no sinal acústico no momento de um vazamento em um ambiente de plataforma de petróleo *offshore*, foram realizados experimentos num ambiente real.

A. Experimento: Características e Particularidades

O experimento foi realizado em uma plataforma de petróleo *offshore* localizado na Bacia de Santos, em zona petrolífera do Pré-Sal. O local escolhido foi um Módulo de Compressão e Exportação de Gás, uma estrutura que contém compressores de gás e permutadores que processam o fluido gasoso elevando sua pressão a 250 Bar. Neste ambiente, o ruído sonoro se faz presente pela composição de sons gerados pelos diversos equipamentos em funcionamento no local. A percepção auditiva gerada por um eventual vazamento é de difícil assimilação humana devido, principalmente, a obrigatoriedade do uso de equipamentos de proteção individual como o protetor auricular tipo concha.

A seguir são apresentadas as principais características da gravação sonora realizada neste ambiente com o intuito de reproduzir cenário de vazamento gasoso:

- Devido à impossibilidade de se gerar um vazamento real de gás, por questões óbvias de segurança, os cenários experimentais foram baseados em perda de contenção de ar pressurizado em aproximadamente 0,7 MPa através da abertura de válvula esfera em linhas de ar de consumo geral presente no módulo;
- Ao total foram realizadas três gravações, em momentos distintos, nomeadas como Cenário 01, Cenário 02 e Cenário 03, todas elas no 2º piso do módulo de compressão

- de gás; as gravações iniciam com a válvula esfera fechada (pré-vazamento) e, após alguns segundos, a válvula é aberta (vazamento);
- Especificação da válvula esfera: aço carbono forjado (ASTM A105), dimensão de 1 polegada e 13,27 bar de pressão máxima de operação;
 - As distâncias entre a válvula e o microfone, e da abertura aproximada da válvula variaram entre os cenários experimentados:
 - Cenário 01: abertura aproximada de 25% da válvula e distância de 2,4 metros;
 - Cenário 02: abertura aproximada de 25% da válvula e distância de 17,7 metros;
 - Cenário 03: abertura aproximada de 15% da válvula e distância de 4,0 metros;
 - As máquinas dos módulos operavam em regime regular, sem anormalidades aparentes. Portanto, o ruído de fundo é aquele normalmente encontrado nestes módulos em operação ordinária e não levantaria atenção dos operadores acerca de algo fora do cotidiano operacional;
 - Para gravação do sinal, foi usado equipamento portátil com microfone embutido com característica omnidirecional e resposta em frequência de 20 Hz a 20 kHz;
 - A gravação foi feita com apenas um canal (*i.e.* monoanal) com taxa de amostragem de 48 kHz e tamanho de palavra de 16 bits.

B. Análise do Sinal Sonoro no Domínio da Frequência

A fim de melhor conhecer as características em frequência para os cenários experimentados, a Figura 1 traz o espectrograma dos sinais sonoros capturados no experimento com utilização da aplicação MATLAB. Percebe-se que na fase de pré-vazamento, a potência espectral está quase totalmente concentrada abaixo dos 9 kHz. Por outro lado, na fase do vazamento, o som propagado pela abertura da válvula irradia potência espectral por toda banda de espectro sonoro (de 20 Hz e 20 kHz).

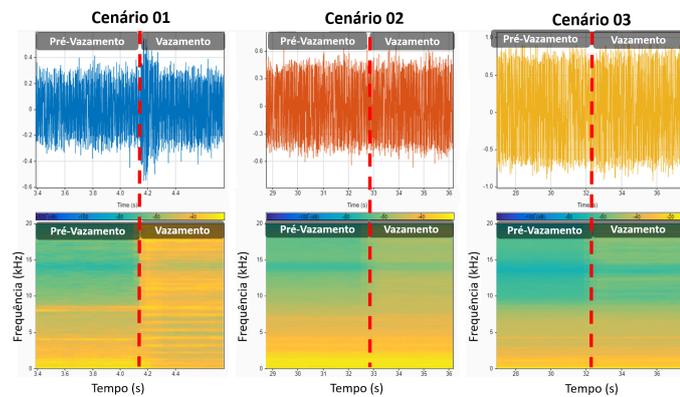


Fig. 1. Espectrograma gerado para os cenários de vazamento experimentados em plataforma de petróleo offshore.

Por outro prisma de análise em frequência, a Figura 2 traz a distribuição de potência espectral em curvas distintas das

fases de pré-vazamento (azul) e vazamento (laranja). Percebe-se que a partir de frequência entre 8 kHz e 9 kHz, a potência espectral das duas fases revelam uma distribuição com diferença substancial. Isto aponta que os vazamentos geraram, para os três cenários experimentados, componentes de energia em mais altas frequências do que aqueles propagados pelo som comum do módulo de processamento. Este resultado vai ao encontro do trazido por [11].

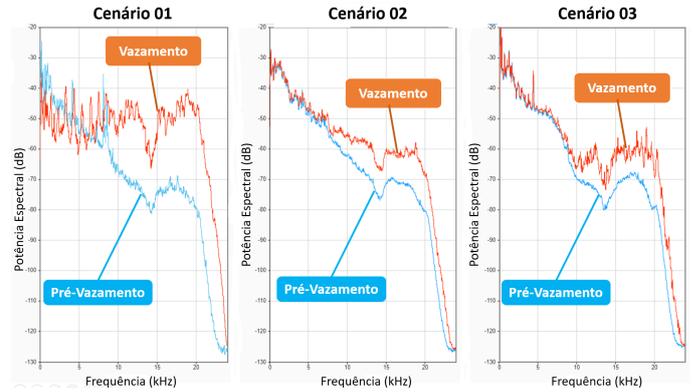


Fig. 2. Potência espectral (dB) para os cenários experimentados da fase de pré-vazamento e vazamento.

IV. SISTEMA DE DETECÇÃO ACÚSTICA AUTÔNOMA BASEADA EM APRENDIZADO DE MÁQUINA E RESULTADOS

A. Estrutura Básica

A Figura 3 apresenta estrutura básica de sistema de detecção autônoma baseada em Aprendizado de Máquina (AM) [13].



Fig. 3. Estrutura básica de sistema autônomo baseado em Aprendizado de Máquina - adaptado de [13].

Nela observamos as etapas relativas ao processo de classificação

B. Pré-Processamento do Sinal

1) *Supressão de Ruído por Transformada Discreta de Wavelet*: Os sinais sonoros coletados de um ambiente industrial são compostos de muita interferência oriundos componentes de ruído de fundo. O uso da supressão de ruído por Transformada de Wavelet consegue efetivamente reduzir os ruído de fundo causados pela modulação das válvulas, operação dos equipamentos, trabalhos realizados no local, ruídos por vibração em tubulações entre outros [10]. Os sinais coletados passaram por um supressor de ruído por transformada discreta de Wavelet simétrica disponível na aplicação *SignalAnalyzer* do MATLAB. Os parâmetros deste supressor de ruído foram

Transformada Discreta Wavelet simétrica número 4, com método de supressão de ruído Bayes, com 9 níveis, regra da mediana para limiarização e estimativa de ruído independente do nível.

2) *Filtragem Passa Alta*: Uma outra etapa do pré-processamento do sinal é a aplicação de uma filtragem passa alta. Esta filtragem se propõe a reduzir as componentes espectrais de energia relacionadas ao ruído ambiental, preservando a potência espectral preponderantemente gerada pelo som do vazamento. Foi aplicada filtragem passa-alta com frequência de corte de 9 kHz, uma inclinação de 0,95 dB/dec e uma atenuação de -80 dB através da aplicação *SignalAnalyzer* no MATLAB.

A Figura 4 mostra o sinal original gravado (azul) e o sinal pré-processado (laranja). Nota-se que o pré-processamento atenua a fase de pré-vazamento de forma mais acentuada do que a fase de vazamento.

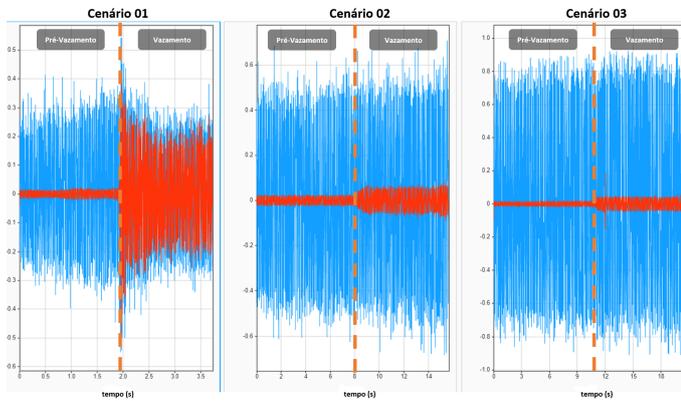


Fig. 4. Sinal sonoro original (cor azul) e sinal pré-processado (cor vermelho) usando o supressor de ruído por decomposição Wavelet e filtro passa alta com frequência de corte em 9 kHz.

C. Janelamento

A etapa de janelamento tem o propósito de realizar o processamento do sinal em segmentos (em inglês *frames*) em curto-prazo. Em soluções de detecção de eventos sonoros, esta técnica tem por objetivo a detecção temporária de atividades.

Para o experimento do presente trabalho, foi usada a técnica de janelamento de Hamming, com *frame* de 2048 bits, uma sobreposição de 25%.

D. Extração de Características

A extração de características de um sinal sonoro refere-se ao processo de transformação de amostras discretizadas do sinal original em um banco de dados com características numéricas. A formação das características revela nuances na formação do sinal original, e são consumidas de forma mais fácil pelos algoritmos de aprendizado de máquina ou aprendizado profundo do que os sinais originais. Efetivamente, um conjunto apropriado de características pode melhorar o desempenho de aplicações de reconhecimento de eventos sonoros e redução da complexidade computacional [14]. É um processo dos mais vitais para se conseguir o bom desempenho de algoritmos de

Aprendizado de Máquina [13]. O trabalho focou na avaliação da relevância das seguintes características no domínio do tempo e frequência: Fluxo espectral, Inclinação espectral, Taxa de Cruzamento pelo Zero e Energia.

Para realizar a extração de características dos sinais de áudio pré-processados, foi utilizada a aplicação Extract Audio Features contida na aplicação Matlab. As Figuras 5, 6 e 7 apresentam as características obtidas para os três cenários experimentados, respectivamente. Da parte superior para inferior do quadro, para as três figuras, tem-se as curvas do sinal sonoro pré-processado, e as características do Fluxo Espectral, a Inclinação Espectral, a Taxa de Cruzamento pelo Zero e a Energia. Na parte intermediária das curvas, uma linha vertical em laranja indica o momento da abertura da válvula. Percebe-se, visualmente, um incremento nos resultados das características extraídas indicando uma distinção quantitativa entre a fase em que não existe um vazamento no módulo de compressão de gás, do momento em que este vazamento acontece com a abertura da válvula.

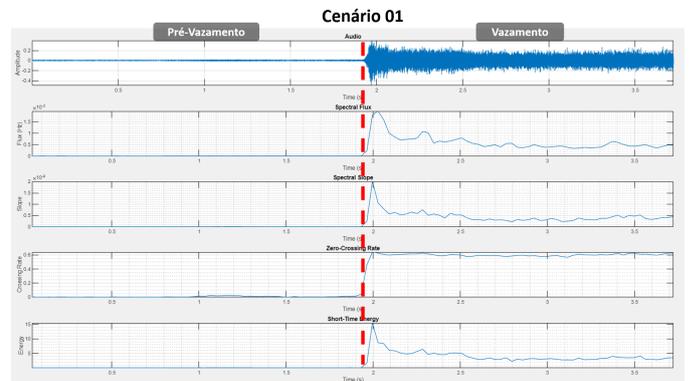


Fig. 5. Características extraídas do experimento do Cenário 01.

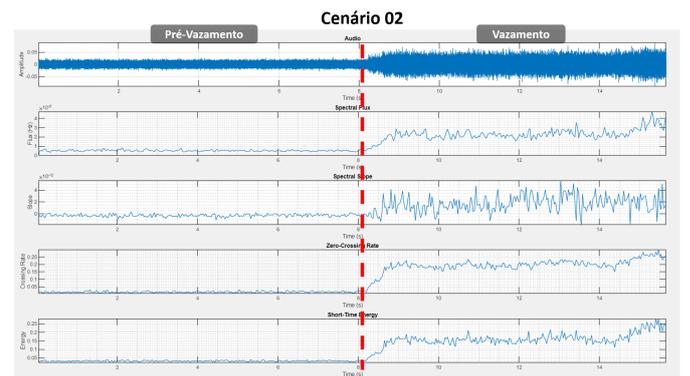


Fig. 6. Características extraídas do experimento do Cenário 02.

A Tabela I apresenta os resultados quantitativos médios das características extraídas para os três cenários experimentados. Ela traz os valores médios das características nas fases de pré-vazamento, vazamento e a distinção percentual entre elas. Observa-se que todas as características apresentam distinção percentual acima dos 200% para os três cenários. Este resultado expressivo é importante na medida em que trará

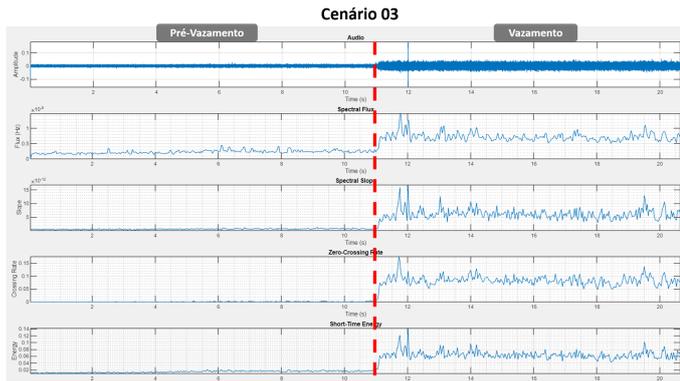


Fig. 7. Características extraídas do experimento do Cenário 03.

maior eficácia aos algoritmos de classificação baseado em Aprendizado de Máquina.

TABELA I

LEVANTAMENTO DOS VALORES MÉDIOS DAS CARACTERÍSTICAS PARA AS FASES DE PRÉ-VAZAMENTO E VAZAMENTO, E A DISTINÇÃO PERCENTUAL ENTRE ELAS PARA OS TRÊS CENÁRIOS EXPERIMENTADOS.

Cenários	Características	Pré-Vaz.	Vaz.	Distinção (%)
Cen. 01	Fluxo (Hz)	3,53E-06	4,54E-04	12.763%
	Inclinação	1,57E-12	3,48E-10	22.042%
	TCZ	8,70E-03	0,5864	6.640%
	Energia	0,0267	3,3764	12.546%
Cen. 02	Fluxo (Hz)	5,11E-06	2,19E-05	328%
	Inclinação	-3,07E-13	2,10E-12	784%
	TCZ	0,0139	0,1962	1.312%
	Energia	0,0308	0,1613	424%
Cen. 03	Fluxo (Hz)	2,04E-06	7,07E-06	246%
	Inclinação	5,58E-13	6,07E-12	989%
	TCZ	1,44E-04	0,082	56.880%
	Energia	0,0127	0,063	396%

V. CONCLUSÕES

A busca por novos métodos e técnicas que entreguem melhores resultados na detecção autônomas de vazamentos de gás em plataformas de petróleo *offshore* é uma necessidade, dada as consequências catastróficas de eventual escalonamento de um evento como este. O trabalho identificou oportunidade de uso do sinal sonoro audível, ou seja, na banda de frequência entre 20 Hz e 20 kHz, para a detecção do vazamentos. Nesta faixa de frequência, quando comparado às ondas ultrassônicas, o sinal propagado pelo evento é menos impactado pelas aglomerações construtivas entre o vazamento e o instrumento amostrador do sinal acústico. Além disso, diversos equipamentos portáteis existentes na indústria contém microfones embutidos capazes de realizar captura de sinal dentro do espectro sonoro audível, o que ampliaria a escala de implementação da solução. Os resultados obtidos são promissores na medida em que a distinção percentual média entre as fases de pré-vazamento e vazamento para as características extraídas são relevantes. Todos os extratores de característica apresentaram resultado acima de 200% na distinção entre as fases do experimento para os três cenários. Esta diferença quantitativa relevante entre um ambiente com e sem vazamento, traz um padrão distinto de dados de entrada

para algoritmos baseado em Aprendizado de Máquina (AM). Isto oferece um melhor desempenho à fase de classificação e, por conseguinte, à detecção do evento de vazamento. Como próximos passos, o trabalho pretende desenvolver algoritmo baseado em AM para construção de modelo classificador e medição seu desempenho na detecção autônoma de eventos de vazamentos.

REFERÊNCIAS

- [1] ANP. Encarte de Consolidação da Produção 2022. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/ptr/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional-e-meio-ambiente/relatorios-anuais-de-seguranca-operacional>.
- [2] MARSH. 100 Largest Losses in the Hydrocarbon Industry 1974-2019. 2020. Disponível em: <https://www.marsh.com/us/industries/energy-and-power/insights/100-largest-losses-in-the-hydrocarbon-industry.html>. Acesso em: 05 jun. 2023.
- [3] IRF. IRF Performance Measurement Project, Project Goals, Scope, Guidelines and Definitions. Disponível em: <https://irfoffshoresafety.com/wp-content/uploads/2018/09/project-scope-and-data-guidlines.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2023.
- [4] ANP. Relatório Anual de Segurança Operacional. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional-e-meio-ambiente/araq/2022-relatorio-anual-seguranca-operacional.pdf>.
- [5] Zhou, C., Zhang, B., Qiao, S., & Mu, C. (2019). A stochastic programming approach for the optimization of gas detector placement in offshore platforms. In *Ocean Engineering* (Vol. 187, p. 106223). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106223>
- [6] M. Meribout, L. Khezzar, A. Azzi, and N. Ghendour, "Leak detection systems in oil and gas fields: Present trends and future prospects," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 75. Elsevier BV, p. 101772, Oct. 2020. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101772.
- [7] Lu, H., Iseley, T., Behbahani, S., & Fu, L. (2020). Leakage detection techniques for oil and gas pipelines: State-of-the-art. In *Tunnelling and Underground Space Technology* (Vol. 98, p. 103249). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103249>
- [8] B. Liu, Z. Jiang, and W. Nie, "Negative pressure wave denoising based on VMD and its application in pipeline leak location," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 35, no. 11. Springer Science and Business Media LLC, pp. 5023–5032, Oct. 31, 2021. doi: 10.1007/s12206-021-1020-3.
- [9] Lighthill, M.J. (1952) On Sound Generated Aerodynamically I. General Theory. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 211, 564-587.
- [10] Xu, Q., Zhang, L., & Liang, W. (2013). Acoustic detection technology for gas pipeline leakage. In *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 91, Issue 4, pp. 253–261). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.05.012>
- [11] W. Tao, W. Dongying, P. Yu, and F. Wei, "Gas leak localization and detection method based on a multi-point ultrasonic sensor array with TDOA algorithm," *Measurement Science and Technology*, vol. 26, no. 9. IOP Publishing, p. 095002, Jul. 21, 2015. doi: 10.1088/0957-0233/26/9/095002.
- [12] DET-TRONICS "FlexSonic™ Acoustic Detector" Specification Data, [https://www.det-tronics.com/content/documents/90-1208-2.3-\(FlexSonic-Acoustic-Specifications\).pdf](https://www.det-tronics.com/content/documents/90-1208-2.3-(FlexSonic-Acoustic-Specifications).pdf) (acessado Junho 03, 2023).
- [13] G. Sharma, K. Umapathy, and S. Krishnan, "Trends in audio signal feature extraction methods," *Applied Acoustics*, vol. 158. Elsevier BV, p. 107020, Jan. 2020. doi: 10.1016/j.apacoust.2019.107020.
- [14] M. Barandas et al., "TSFEL: Time Series Feature Extraction Library," *SoftwareX*, vol. 11. Elsevier BV, p. 100456, Jan. 2020. doi: 10.1016/j.softx.2020.100456.