

1 – IDENTIFICAÇÃO

Nome do Bolsista Débora Ladeira	Matrícula 119012552
Título do Programa PEN0 – Programa de Engenharia Naval e Oceânica	
Título do Curso / Especialização Mestrado em Estruturas Oceânicas	
Instituição Universidade Federal do Rio de Janeiro	Sigla UFRJ
Nome do Orientador (1) Theodoro Antoun Netto	Nome do Orientador (2)

2 – TÍTULO DO TRABALHO

Detecção de vazamentos e vandalismo em dutos de transporte de combustível utilizando metodologias acústicas de inspeção

3 – INTRODUÇÃO / OBJETIVO (no máximo 1 página)

No Brasil, a exploração de jazidas submarinas de petróleo tem representado grande parcela da produção energética há algum tempo, sendo responsável por mais de 90% da produção nacional de petróleo desde 2003 (1). Esta proporção vem aumentando e, além disso, o setor apresenta crescimentos altíssimos há algumas décadas. Em onze anos, de 1998 a 2009, a produção de petróleo mais do que dobrou, passando de 1,003 mil barris por dia (Mb/d) para 2,024 Mb/d (1) (2). Conforme apresentado nos anuários da ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) (1) (2) (3), estes números continuaram crescendo ainda mais após o início da exploração dos campos do pré-sal em 2014, na Bacia de Santos. Desde de 2014, todos os anos o Brasil bate seu próprio recorde de produção de petróleo, tendo sido 2.877 barris por dia em 2019 (3). Os números são bastante promissores, porém estas altas taxas de crescimento devem ser acompanhadas de aprimoramentos nas áreas de segurança, gestão e integridade da produção de petróleo, para que o aumento da exploração reflita conforme previsto no desenvolvimento da economia brasileira.

Um dos maiores problemas associados à integridade da produção de petróleo é o vandalismo, que representa prejuízos enormes às operadoras e ao meio ambiente. O vandalismo de dutos se caracteriza pelo ato de perfurar dutos com a intenção de roubar o combustível transportado. O vandalismo impacta diretamente na diminuição dos lucros da produção, portanto, a identificação e prevenção do vandalismo é um assunto extremamente estratégico para as operadoras. O vandalismo pode se dar tanto nos dutos de óleo cru, como ocorre com frequência na Nigéria (4), quanto nos dutos de transporte gasolina, como é comum no Brasil. O vandalismo de dutos de gasolina geram um prejuízo ainda maior à operadora, uma vez que a gasolina tem um valor agregado maior que do petróleo cru, dado todos os processos de refino a que foi submetida. Além dos problemas econômicos, o vandalismo oferece riscos ambientais, sociais e à vida humana (4).

A comunidade acadêmica brasileira não tem se concentrado neste assunto nos últimos anos, e dado o contexto atual, o estudo em desenvolvimento visa a formulação de uma metodologia de detecção de vandalismo em dutos de transporte de gasolina com utilização de ondas acústicas.

4 – RELEVÂNCIA DO TEMA / JUSTIFICATIVA (no máximo 1 página)

Conforme apontado na sessão anterior, o Brasil é um grande produtor de petróleo e este setor é um dos grandes impulsionadores do desenvolvimento da economia nacional. O desafio de produzir cada vez mais tem sido possível graças ao pré-sal, situado na Bacia de Santos, porém este impõe novos desafios para a engenharia *offshore*. Dentre os principais desafios para a exploração de petróleo no pré-sal se destacam: as jazidas se situam à grandes profundidades na camada rochosa, trazendo dificuldades para a perfuração e extração; a região do pré-sal é caracterizada como águas ultra-profundas uma vez que tem-se uma média de 2.100 metros de profundidade, o que torna o sistema submarino mais robusto e conseqüentemente mais caro; há grande presença de gases corrosivos como enxofre e CO₂ nos poços, oferecendo riscos à integridade dos *risers* e *flowlines* (5).

Portanto, apesar do aumento da produção, tem-se também um aumento do custo de produção dos barris do petróleo brasileiro. Uma vez que na seção 3 foi apontado que além dos impactos ambientais, sociais e humanos, o vandalismo de dutos de transporte de gasolina acarreta em prejuízos financeiros às operadoras, estes se traduzem em prejuízos econômicos para o país, que não cresce conforme as taxas projetadas para o setor de óleo e gás, já que parte do óleo produzido não chega à economia através das operadoras, e sim por meios clandestinos (6). A Nigéria perde cerca de 12 bilhões de dólares anualmente em decorrência de vandalismos em oleodutos de petróleo (7). Este cenário evidencia a grande necessidade de identificar e eliminar vandalismos, para que seja garantida a segurança e integridade dos dutos e da gasolina, e o crescimento econômico do país.

5 – ESTADO DA ARTE E METODOLOGIA (no máximo 3 páginas)

Existem inúmeros métodos para detecção de vazamentos e vandalismo em dutos metálicos. No Brasil, a inspeção e monitoramento de dutos se dá majoritariamente com a utilização de PIGs (*Pipeline Inspection Gauges*) instrumentados, que percorrem o interior dos dutos para operações de avaliação de integridade. Em geral, os PIGs são usados para limpeza e inspeção da parede interna para identificar quaisquer anomalias indesejáveis ao bom funcionamento dos dutos (8). Dentre as técnicas mais empregadas na indústria brasileira para detecção de vazamentos, encontram-se MFL (*Magnetic Flux Leakage*) (9) e UT (*Ultrasonic Testing*), sendo o primeiro uma técnica eletromagnética capaz de mapear pontos em que há redução da espessura da parede interna do duto e o segundo uma técnica que emprega ultrassom. No estado da arte dos chamados métodos ILI (*Pipeline Inline Inspection*) encontram-se os dois métodos já citados, além dos seguintes: EC (*Eddy Current*); PEC (*Pulsed Eddy Current*) e EMAT (*Electromagnetic Acoustic Transducer*) sendo estes três métodos eletromagnéticos, porém o método EMAT é uma conjugação de eletromagnetismo com acústica, como o próprio nome sugere (10). Há também métodos termográficos e radiográficos, que normalmente requerem o uso de um ROV (*Remote Operator Vehicle*), que os tornam métodos bastante caros (11).

O presente estudo se concentra na utilização de técnicas acústicas para detecção de vazamentos e vandalismo em dutos. As técnicas de inspeção baseadas em métodos acústicos podem ser classificadas

em técnicas acústica ativa, passiva ou híbrida (ativa/passiva). Todas essas técnicas se baseiam em reflectometria acústica, que tem se mostrado uma área de pesquisa promissora e em constante desenvolvimento. A técnica ativa é operada pela injeção de um sinal acústico no fluido dentro da tubulação para detectar remotamente bloqueios, vazamentos e vários componentes presentes na tubulação, a longas distâncias. A técnica passiva também consiste na injeção de um sinal acústico no fluido dentro da tubulação, porém a detecção de vazamentos/derivações se dá à curtas distâncias. Os PIGs instrumentados que utilizam técnicas acústicas para inspeções são caracterizados como híbridos, uma vez que utilizam mais de uma técnica.

O estudo da reflectometria acústica em tubulações vem avançando desde Sharp & Campbell (12), que concluíram que a partir da emissão de pulsos acústicos e da medição da impedância de entrada, é possível reconhecer o perfil do duto, sem vazamentos, e detectar a presença de vazamentos. Wang et al. (13) e Papadopoulou et al. (14) desenvolveram sistemas para detecção de bloqueios e vazamentos em gasodutos, ambos utilizaram tecnologia ativa e observaram que caso haja qualquer mudança na impedância acústica, ou seja, qualquer mudança na seção do duto, sejam bloqueios ou perdas na parede, como vazamentos, estas podem ser identificadas pelos sinais acústicos refletidos medidos pelos microfones. A medição das reflexões produzidas pela emissão do pulso emitido, que viaja no comprimento do duto, torna possível a localização dos bloqueios e vazamentos detectados, além de válvulas e outros acessórios presentes na linha. Segundo Papadopoulou et al. (14) é possível quantificar a distância do bloqueio, vazamento ou depósito de água, a partir da reflexão advinda desta anomalia.

Um caso particular da aplicação de reflectometria acústica para atenuação de ruídos em tubulações é conhecido como ressonador. Os ressonadores são caracterizados basicamente por uma tubulação principal que contém uma ramificação. As geometrias mais utilizadas são do tipo: QWT (*Quarter Wavelength Tube*), em que se tem uma ramificação de diâmetro constante no duto principal; e HR (*Helmoltz resonator*) que apresenta um alargamento da seção transversal da ramificação (15).

Tendo em vista que as trepanações ilegais instaladas nos dutos de transporte de gasolina se assemelham a um ressonador do tipo QWT (*Quarter Wavelength Tube*), este trabalho se concentra no estudo dos ressonadores QWT. Os ressonadores do tipo QWT são largamente utilizados na indústria para atenuação de ruídos, sendo bastante conhecidos da indústria automobilística que utiliza conjuntos de ressonadores QWT no sistema de silenciadores de compressores de carros pequenos e veículos comerciais (15). A construção civil também utiliza este conceito, neste caso para atenuar ruídos no interior de edifícios, através da utilização de ventilações tubulares do tipo QWT. Tubulações do instrumento musical conhecido como órgão também são considerados tipos especiais de ressonadores QWT (16). O projeto de ressonadores QWT é bastante conhecido e consolidado na literatura para gasodutos (17) e (18).

Através do estudo da reflectometria acústica sabe-se que, a presença da cavidade do QWT causa

uma mudança na impedância acústica, portanto, uma onda acústica é refletida no interior da cavidade. Este processo resulta em ondas estacionárias sendo criadas na cavidade, que em certas condições, podem conduzir a um estado de ressonância (16). O projeto de ressonadores QWT se dá basicamente pela relação entre o comprimento da cavidade do ressonador e a frequência de onda desejada para ressonância no QWT, no caso a frequência de onda incidente. Através da solução da equação de ondas em sua forma potencial, e aplicando as condições de contorno típicas do QWT, chega-se à relação da equação (1) conforme (15).

$$f_{QWT} = (2n - 1) \frac{c}{4L} \quad (1)$$

Sendo:

$n = 1, 2, 3, 4, \dots$

f_{QWT} – frequência de ressonância no QWT

c – velocidade do som no fluido

L – comprimento da cavidade do QWT

Pela equação (1) nota-se que a frequência de ressonância no QWT é inversamente proporcional ao comprimento da cavidade do QWT. Sabendo a frequência de ressonância desejada, uma vez que é conhecida a frequência do sinal acústico emitido, é possível dimensionar o comprimento da cavidade do QWT. Ou numa engenharia reversa, sabendo-se o comprimento da cavidade do QWT, a emissão de um sinal com a frequência de ressonância associada ao comprimento da cavidade através da equação (1) fornece uma atenuação do sinal acústico na cavidade. Nos estados de ressonância, a certas distâncias da cavidade pode-se ter tanto atenuação ou amplificação do sinal acústico ao longo da tubulação principal, a depender do tipo de interferência das ondas emitidas e refletidas ao longo do QWT (construtivas ou destrutivas) (17).

A metodologia em desenvolvimento neste plano de trabalho tem por objetivo estudar o comportamento de ressonadores do tipo QWT como aplicação para identificação de vazamentos e vandalismos em dutos de transporte de gasolina. Através de três frentes de estudos a serem correlacionadas, analítica conforme mostrado na equação (1), numérica através de modelos bidimensionais de QWT a serem desenvolvidos no Abaqus, e experimental através de testes em laboratório. Uma vez que dutos reais de transporte de gasolina são compostos por soldas, e inevitavelmente há inúmeras descontinuidades na parede interna dos dutos que levam a mudanças na impedância, faz-se necessário um estudo aprofundado de tratamento e análise de sinais acústicos para uma identificação precisa de vazamentos/derivações e sua localização. Groves e Lennox (19) publicaram um estudo sobre métodos analíticos para separação de ondas emitidas e refletidas que apresentou bons resultados no que diz respeito à identificação e localização de diversas descontinuidades.

6 – ETAPAS (no máximo 2 páginas)

As etapas para o desenvolvimento da dissertação de mestrado consistem em:

- Revisão bibliográfica – estudo e escrita;
- Escrita da introdução e objetivos;
- Escrita da metodologia analítica;
- Escrita da metodologia numérica;
- Escrita da metodologia experimental;
- Entrega do Seminário de Mestrado;
- Aprofundamento das técnicas de modelagem em elementos finitos no Abaqus;
- Aprofundamento dos conhecimentos de programação no Matlab;
- Estudos de técnicas de tratamento e análise de sinais acústicos;
- Modelagem e simulações numéricas do QWT no Abaqus;
- Avaliação de resultados numéricos;
- Dimensionamento e acompanhamento dos testes experimentais de ressonadores QWT em laboratório a partir dos resultados numéricos;
- Programação de técnicas de tratamento e análise de sinais acústicos dos resultados dos testes experimentais no Matlab;
- Avaliação e escrita de resultados numéricos e experimentais;
- Escrita da correlação analítica-numérica-experimental;
- Avaliação e escrita da aplicação da teoria do QWT como método para identificação de vazamentos/vandalismo em dutos de transporte de gasolina;
- Revisão textual;
- Principais resultados e conclusões;
- Trabalhos futuros;
- Revisão textual final.

7 – CRONOGRAMA DE TRABALHO (no máximo 1 página)

Etapas para a conclusão e entrega da dissertação de mestrado	Meses remanescentes para a defesa da dissertação																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Revisão bibliográfica – estudo e escrita	■	■	■															
Escrita da introdução e objetivos	■	■	■	■														
Escrita da metodologia analítica		■	■	■	■													
Escrita da metodologia numérica			■	■	■	■												
Escrita da metodologia experimental				■	■	■	■											
Entrega do Seminário de Mestrado					■	■	■	■										
Aprofundamento das técnicas de modelagem em elementos finitos no Abaqus						■	■	■	■									
Aprofundamento dos conhecimentos de programação no Matlab							■	■	■	■								
Estudos de técnicas de tratamento e análise de sinais acústicos								■	■	■	■							
Modelagem e simulações numéricas do QWT no Abaqus									■	■	■	■						
Avaliação de resultados numéricos										■	■	■	■					
Dimensionamento e acompanhamento dos testes experimentais de ressonadores QWT em laboratório a partir dos resultados numéricos											■	■	■	■				
Programação de técnicas de tratamento e análise de sinais acústicos dos resultados dos testes experimentais no Matlab												■	■	■	■			
Avaliação e escrita de resultados numéricos e experimentais													■	■	■	■		
Escrita da correlação analítica-numérica-experimental														■	■	■	■	
Avaliação e escrita da aplicação da teoria do QWT como método para identificação de vazamentos/vandalismo em dutos de transporte de gasolina															■	■	■	■
Revisão textual																■	■	■
Principais resultados e conclusões																	■	■
Trabalhos futuros																		■
Revisão textual final																		■

8 – DISCIPLINAS DA ESPECIALIZAÇÃO (listar as disciplinas complementares obrigatórias para o PRH-ANP que pretende cursar)

As disciplinas já cursadas durante a especialização em estruturas oceânicas pelo PENO são:

- COV743 - Resistência Estrutural Avançada;
- COV717 – Design of Ocean System;
- COV771 – Introdução à Mineração de dados;
- COV756 – Sistemas Submarinos de Produção I;
- CPE727 – Aprendizado Profundo;
- COV841 – Fadiga de Estruturas Oceânicas
- COV845 – Instabilidade Estrutural;
- CPV747 – Escrita Científica para Engenharia Oceânica;
- COC786 – Inteligência Computacional

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANP. Agência Nacional de Petróleo, G. N. (2007). *Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2007*.
- (2) ANP. Agência Nacional de Petróleo, G. N. (2013). *Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2013*.
- (3) ANP. Agência Nacional de Petróleo, G. N. (2020). *Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020*.
- (4) "Bleeding Nigeria through the Pipelines": Understanding Oil pipeline Vandalism in Arepo, Southwes Nigeria. Oludayo Tade, Austin Ayodele. 1, Ibadan, Nigeria : The Nigerian Journal of Sociology and Anthropology , 2019, Vol. 17. 0331-4111.
- (5) Cristiano Vilardo, Emilio Lebre La Rovere. Multi-project environmental impact assessment: insights from offshore oil and gas development in Brazil. Impact Assesment and Project

Appraisal. 2018.

- (6) Danielle L. Ornelas, Pietro A. S. Mendes, Alessandra Magrini, Maurício C. Arouca. Offshore oil and gas exploration and production in Brazil: a proposal for integrated actions for operational, occupational and environmental safety. *Journal of World Law and Business*. 4, 2014, Vol. 7, 4.
- (7) Franklin O. Okorodudu, Philip O. Okorodudu, Lawrence O. Atumah. A monitoring system for petroleum pipeline vandalism in the Niger Delta region of Nigeria. *International Journal of Research - Granthaalayah*. 6, 2018, Vol. 6, 6.
- (8) Giancarlo Bernasconi, Giuseppe Giunta. Acoustic detection and tracking of a pipeline inspection gauge. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020.
- (9) Mazzini, Carlos Eduardo. Comparação entre métodos de inspeção de integridade de dutos: método PIG e CIS/DCVG. Vitória : Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.
- (10) A novel pulsed eddy current method for high-speed pipeline inline inspection. Guanyu Piao, Jingbo Guo, Tiehua Hu, Yiming Deng, Henry Leung. s.l. : Elsevier, 2019, Vol. 295.
- (11) Murvay, P., and Silea, I., 2102, "A survey on gas leak detection and localization techniques", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 25, pp. 966-973.
- (12) Sharp, D., & Campbell, D., 1997, "Leak detection in pipes using acoustic pulse reflectometry", *ACUSTICA, acta Austica*, 83, pp. 560-566.
- (13) Wang, X., Lennox, B., Turner, J., & Dawson, K., 2009, Blockage detection in long lengths of pipeline using a new acoustic method. *The Sixteenth International Congress on Sound and Vibration, Krakow, Poland*.
- (14) Papadopoulou, K.A., Shamout, M.N., Lennox, B., Mackay, D., Taylor, A.R., Turner, J.T., and X. Wang, 2008, "An evaluation of acoustic reflectometry for leakage and blockage detection", *Proc. IMechE*, 222 Part C: J. Mechanical Engineering Science.
- (15) Allam, Sabry. Low Noise Intake System Development for Turbocharged I.C. Engines Using Compact High Frequency Side Branch Resonators. *Science & Education Publishing*. 1, 2015, Vol. 1.
- (16) C. D. Field, F. R. Fricke. Theory and Applications of Quarter-wave Resonators: A prelude to their use for attenuating noise entering buildings through ventilation openings. *Applied Acoustics*. 1998, Vol. 53.
- (17) Howard, Carl. Transmission Matrix Model of a Quarter-Wave-Tube with Gas Temperature Gradients. *Proceedings of Acoustics*. 2013.
- (18) Carl Q. Howard, Richard A. Craig. Noise reduction using a quarter wave tube with different orifice geometries. *Applied Acoustics*. 2013.
- (19) K. H. Groves, B. Lennox. Directional wave separation in tubular acoustic systems - The development and evaluation of two industrially applicable techniques. *Applied Acoustics*. 2016.

10 – OBSERVAÇÕES PERTINENTES (por exemplo recursos financeiros envolvidos etc)

Agradeço à ANP por prover os recursos financeiros necessários ao desenvolvimento deste estudo e

fomentar a pesquisa no setor de óleo e gás no Brasil.

Local

Rio de Janeiro

Data

27 / 12 / 2020