



DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM DUTOS UTILIZANDO ANÁLISE DINÂMICA

Jonas Rafael Duarte Cavalcante

Davi Vieira Barbosa

Wayne Santos de Assis

rdcjonas@hotmail.com

davivieirab@gmail.com

wayne.assis@gmail.com

Universidade Federal de Alagoas - Centro de Tecnologia - Laboratório de Computação Científica e Visualização

Av. Lourival Melo Mota, s/n - Tabuleiro, 57072-970, Maceió - Alagoas, Brasil

Resumo. *Este trabalho trata do estudo de uma estratégia para detecção de vazamentos através da investigação teórica e experimental do comportamento dinâmico de dutos, utilizando-se técnicas de análise dinâmica linear para o tratamento e avaliação dos sinais. Para a aquisição dos dados, fez-se uso de uma rede de acelerômetros capacitivos uniaxiais conectados a um sistema de aquisição de dados, a qual foi aplicada a uma tubulação projetada para a condução de experimentos. Essa tubulação é dotada de trechos que permitem considerar diversas configurações de vinculação estrutural e de pontos para a produção de vazamentos induzidos, com controle de vazão. A avaliação da ocorrência de vazamentos é feita a partir da comparação entre os valores de frequência natural obtidos a partir do monitoramento da tubulação nas condições íntegra e com dano simulado, considerando também os correspondentes valores teóricos estimados para as frequências naturais. Os resultados obtidos e as análises realizadas viabilizaram uma discussão sobre a técnica e recursos utilizados e a correlação entre a alteração do valor da frequência natural e a presença de vazamentos na tubulação nas diversas condições estudadas.*

Palavras-chave: *análise dinâmica, condutos, vazamentos.*

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da indústria do petróleo no país e da importância do petróleo e do gás natural na matriz energética mundial, houve a necessidade de se desenvolver técnicas para monitorar as tubulações responsáveis pelo transporte desses fluidos. Esta operação de transporte está sujeita a falhas devido à ação de agentes de natureza físicoquímica que acabam por deteriorar a parede do duto por meio de corrosão ou fraturas, tornando as instalações susceptíveis a acidentes operacionais com perda de fluido para o meio exterior, com potencial de provocar grandes prejuízos ecológicos e financeiros, requerendo assim toda proteção disponível para manter sua integridade. Quando da ocorrência de um vazamento em um duto, o mais importante é sua imediata detecção e alarme, já que isto acarreta em diversos prejuízos significativos, desde a interrupção ou redução de operação da unidade afetada, até o risco de impacto ambiental relacionado à contaminação pelo fluido conduzido. Neste cenário, a Universidade Federal de Alagoas (UFAL), através do Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV), vem aplicando técnicas de análise dinâmica para estudar o comportamento de condutos com circulação interna de fluido pelo projeto Sistemas Inteligentes Aplicados a Dutos (SIADUTOS).

Qualquer resposta dinâmica de uma máquina ou estrutura pode ser obtida por superposição de seus modos naturais (ou normais) de vibração quando as amplitudes do sistema são pequenas (regime linear). Uma descrição dinâmica completa da máquina ou estrutura requer a determinação das frequências naturais, formas modais, e parâmetros do sistema (massas, rigidezes, e constantes de amortecimento equivalentes). Toda estrutura tem a tendência de vibrar em determinadas frequências, chamadas de naturais, cada uma delas está associada a uma determinada forma que o modelo tende a assumir, chamada de forma modal. Quando uma estrutura está sendo excitada por uma carga dinâmica com uma frequência que coincide com uma de suas frequências naturais, ela enfrenta grandes deslocamentos e tensões e esse fenômeno é conhecido como ressonância. Um modelo real possui um número infinito de frequências naturais. No entanto, um modelo de elementos finitos possui um número finito de frequências naturais que é igual ao número de graus de liberdade considerados no modelo (CAVALCANTE, 2014).

Uma vez conhecidas as propriedades dinâmicas do duto sem vazamento, e sabendo que, em dutos com transporte interno de fluido, um vazamento através de uma fratura na parede gera vibrações na parede com uma faixa de frequências conhecida, e que a própria danificação do duto implicará em alterações imediatas nos valores das frequências naturais, é possível, por meio da monitoração dinâmica do duto, identificar a ocorrência de um vazamento logo após o seu início. Adicionalmente, a localização do ponto de vazamento pode ser feita a partir de informações das ondas de superfície geradas por ocasião do vazamento associadas à técnicas de detecção do atraso de propagação da onda, ou mediante tratamento matemático das vibrações captadas pelos acelerômetros através de análise espectral via FFT (Fast Fourier Transformed) e função de correlação cruzada (BOARATTI, 2006).

A transformada de Fourier pode ser obtida da série de Fourier exponencial e é bastante usada em aplicações de processamento de sinais, pois transforma uma resposta do domínio do tempo para o domínio da frequência.

Para Wachel (1990), a frequência natural de qualquer extensão da tubulação pode ser calculada se o fator de frequência, o comprimento do vão, o diâmetro, espessura da parede e o peso por unidade de comprimento são conhecidos. Por um trecho de tubulação uniforme em linha

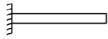
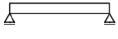
reta, a frequência natural pode ser calculada utilizando a seguinte relação:

$$f_0 = \frac{\lambda}{2\pi} * \sqrt{\frac{gEI}{\mu l^4}} \quad (1)$$

Onde: f_0 é a frequência natural de vibração no trecho analisado, g é a constante gravitacional, E é o módulo de elasticidade do material, I é o momento de inércia da seção, l é o comprimento do trecho analisado, λ é fator de frequência que depende da configuração de apoio do duto e μ é o peso por unidade de comprimento (incluindo fluidos e isolamento).

Os valores dos fatores de frequência utilizados neste trabalho foram, segundo Wachel (1990), definidos na tabela a seguir:

Tabela 1: Fatores de frequência a partir da configuração da tubulação

Configuração da tubulação	λ (1°)	λ (2°)
 Fixo - livre	3,52	22,4
 Simplesmente apoiado	9,87	39,5
 Fixo - apoiado	15,4	50,0
 Fixo - fixo	22,4	61,7
 Curvatura em L	16,5	97,6
 Curvatura em U	18,7	111,6
 Curvatura em Z	23,4	34,2

Nesse contexto, para tal análise, utilizou-se a tubulação de ensaio disponível no Laboratório de Simulação e Controle de Processos (LASIC), com vazão controlada e pontos para simulação de dano. No processo de constatação do vazamento em um duto foram utilizados transdutores acelerômetros capacitivos em pontos estratégicos, onde, com o auxílio de sistema de aquisição de dados, foi feita a interpretação dos sinais captados pelos transdutores para posterior comparação dos valores obtidos com aqueles calculados pelo modelo proposto por Wachel.

O trabalho teve como objetivo utilizar técnicas acelerométricas, e posterior análise de resultados, para detectar qualitativamente uma fonte pontal de vazamento em um conduto livre e atém-se a análises do comportamento dinâmico da tubulação, de modo a determinar a existência ou não do vazamento, de maneira que não foram abordados nesse trabalho métodos para localização do dano, somente métodos com objetivo de identificá-lo. As considerações de duto livre são decorrentes da baixa potência da bomba responsável pela circulação do fluido quando comparada com o comprimento da tubulação.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento dessa atividade, foi necessária, inicialmente, uma revisão bibliográfica fundamentada nos conteúdos de dinâmica e monitoramento estrutural, comportamento mecânico de condutos com transporte de fluido, tratamento de sinais e estatística.

Os ensaios foram realizados em uma tubulação de PVC de 960m de comprimento e $\frac{3}{4}$ " de diâmetro interno. A tubulação conta com 1 bomba de 1 HP responsável pela circulação do fluido e 1 rotâmetro, necessário para conhecimento da vazão transportada. Os experimentos foram conduzidos com a circulação interna de um fluido com escoamento monofásico de água livre, nas condições de duto íntegro e com vazamento induzido. Foram posicionados acelerômetros capacitivos, fixados na tubulação com fita adesiva do tipo silver tape, mantendo sempre um acelerômetro antes e outro depois da fonte de vazamento, de modo que os sinais emitidos por estes dispositivos foram recebidos pelo sistema de aquisição e transferidos ao computador. Os vazamentos foram induzidos nos 3 (três) pontos existentes na tubulação e simulados para valores de vazão conhecidos, sendo estes correspondentes a 5, 10, 20, 30, 40 e 50% da vazão total transportada pelo duto.



Figura 1: Acelerômetro fixado à tubulação

Em adição, foram posicionados acelerômetros em diferentes condições de apoio e utilização da vazão em seu valor máximo, de forma que seja possível a comparação entre os valores de frequência interpretados pelo software de aquisição e pelo método de Wachel em outras situações.



Figura 2: Tubulação utilizada nos ensaios

2.1 ACELERÔMETROS CAPACITIVOS

Os transdutores de aceleração capacitivos uniaxiais, segundo Figueiredo (2006), medem acelerações através da leitura das alterações em condensadores elétricos. O elemento sensor consiste em duas placas condensadoras paralelas atuando em modo diferencial. Estes condensadores operam em um circuito de ponte, por intermédio de dois condensadores fixos, e alteram a tensão de pico gerada por um oscilador quando a estrutura está submetida a acelerações.

Os transdutores utilizados nos ensaios foram acelerômetros capacitivos da marca Silicon Designs, Inc, modelo 2210-010 com frequência de resposta (Nominal 3dB) 0 – 600 Hz, sensibilidade: 12,5 kHz/g e input Range: $\pm 10g$, os quais operam tipicamente para baixas gamas de frequências e tem como sua principal vantagem o baixo custo de aquisição quando comparados com outros transdutores.

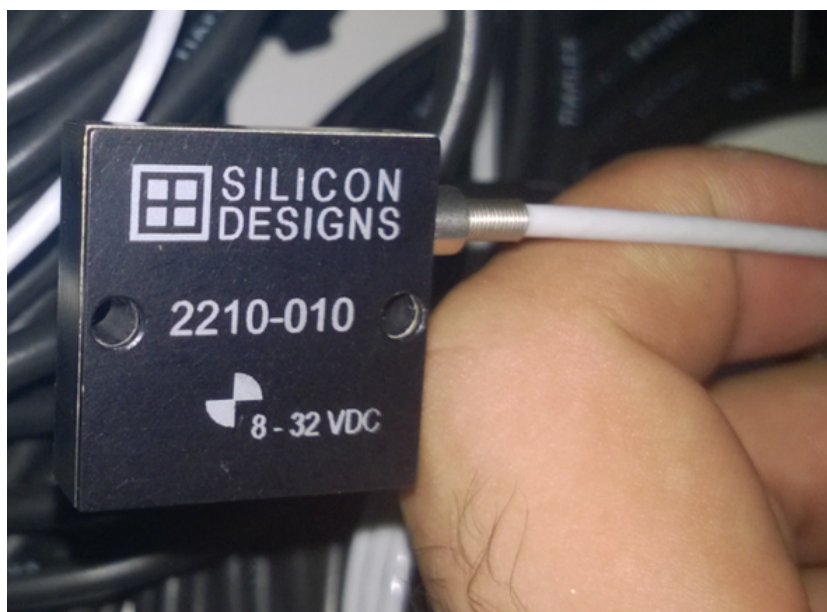


Figura 3: Acelerômetro capacitivo uniaxial usado nos ensaios

2.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO

O sistema de aquisição é o dispositivo responsável pela recepção, condicionamento, armazenamento e transmissão das leituras registradas nos sensores. O sistema de aquisição está dividido em sistema analógico e sistema digital. A transição entre os dois sistemas é realizada pelo conversor analógico-digital (A/D) ou digital-analógico (D/A). (Figueiredo, 2006)

Para adquirir os dados de processo foi utilizado um sistema de aquisição de dados da HBM, série QUANTUMX, modelo MX-840A. Trata-se de um aparelho de condicionamento e aquisição de dados, com 8 canais multifuncionais, oferecendo um conversor analógico/digital de 24 bits por canal, taxa de amostragem de até 19200Hz por canal, filtros de 0,01Hz a 3,2KHz, com alimentação para transdutores de 5 a 24Vdc, interface Ethernet e Firewire.



Figura 4: Sistema de aquisição de dados HBM QuantumX MX840A

2.3 SOFTWARE DE AQUISIÇÃO

O sistema de aquisição de dados é gerenciado por um software desenvolvido pelo mesmo fabricante do sistema de aquisição e de total compatibilidade com o mesmo, denominado Catman Easy, o qual realiza as tarefas de visualização, registro, análise em tempo real e pós-processamento dos dados adquiridos, inclusive a conversão dos sinais de aceleração em frequência, a partir de seu algoritmo interno de tratamento por FFT, que é fundamentado no que expressa a equação 2. Catman Easy, com sua interface intuitiva, simplifica a aquisição, visualização e análise dos dados obtidos ao longo das medições.

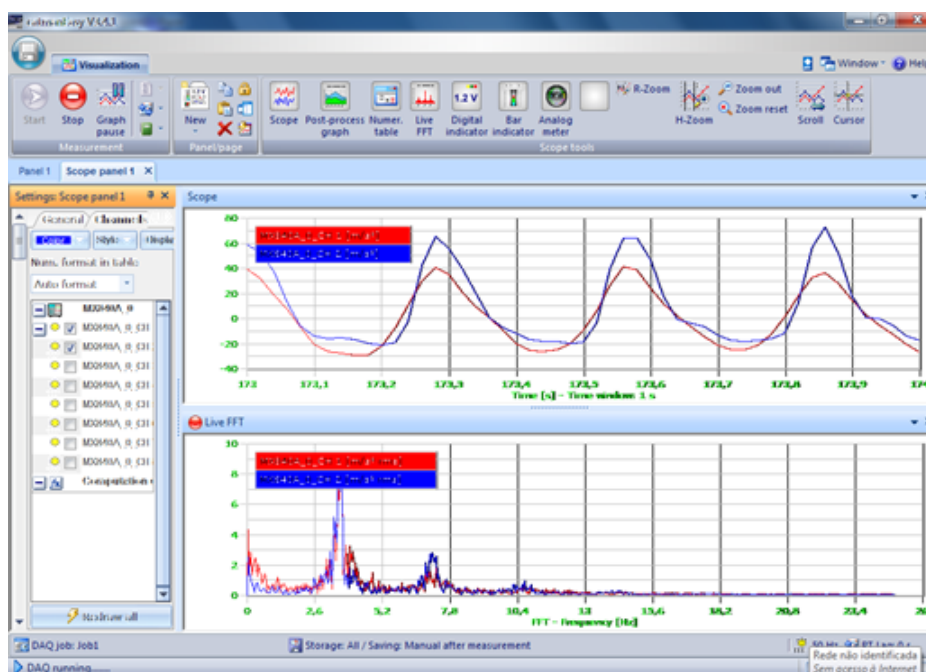


Figura 5: Interface do Catman Easy durante as análises

3 ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÕES

3.1 SIMPLEMENTE APOIADO

Para definir o valor base para análise da frequência do duto íntegro, utilizou-se como fundamento a equação apresentada por Wachel (1990), adotando o fator de frequência $\lambda = 9,87$ para as condições do duto ensaiado (simplesmente apoiado), além dos valores:

- Módulo de elasticidade E do PVC - $2,943 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}$
- Momento de inércia da seção - $I = \frac{\pi}{64} * (0,0264^4 - 0,0238^4) = 8,09 \cdot 10^{-9} m^4$
- Comprimento do trecho analisado l - 1,35m
- Peso por unidade de comprimento (Tubo + água) - $\mu = 7,11 \frac{N}{m}$
- Aceleração da gravidade g - $9,81 \frac{m}{s^2}$

Dessa forma, chegamos a:

$$f_0 = \frac{\lambda}{2\pi} * \sqrt{\frac{gEI}{\mu l^4}} \rightarrow f_0 = 4,94 Hz \quad (2)$$

Os acelerômetros foram posicionados mantendo sempre um ponto de vazamento entre dois acelerômetros consecutivos, conforme representado na Figura 5, assim, para as situações em que houve simulação de vazamento, os resultados apresentaram sempre dois valores de frequência, um captado imediatamente antes do vazamento e outro imediatamente depois.

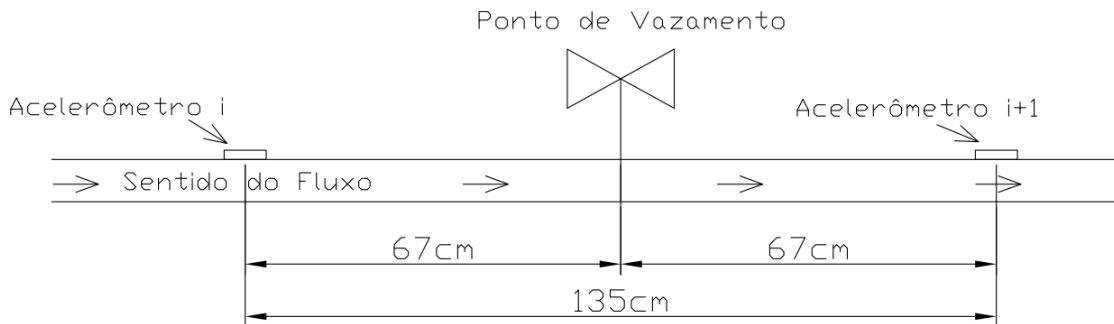


Figura 6: Esquema geral do posicionamento dos acelerômetros nas medições

As frequências de primeiro modo foram medidas na configuração do duto íntegro e com vazamento induzido nos três pontos simulados para cada uma das vazões de 5, 10, 20, 30, 40 e 50% da vazão total transportada pelo duto, conforme citado.

Primeiro ponto de vazamento. Neste caso, o acelerômetro 2 (azul) foi posicionado à jusante do ponto de vazamento e o 3 (verde) à montante.

O resultado obtido no software Catman Easy para a distribuição de frequências, sem vazamento, é dado a seguir:

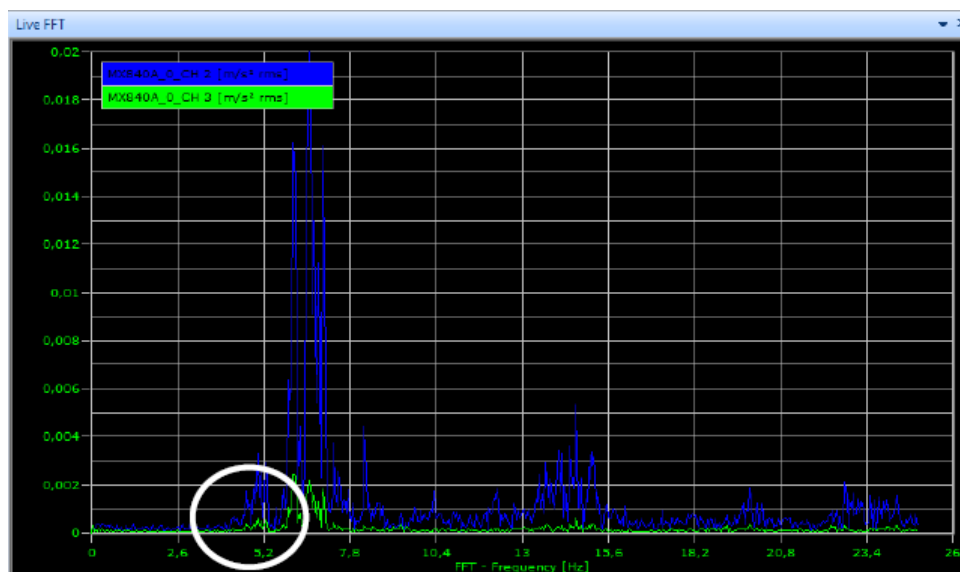


Figura 7: Primeiro ponto - Valores de frequência - Acelerômetros 2 e 3 - Sem vazamento associado

Assim, para facilitar a visualização fez-se necessário ampliar a faixa de frequências referentes ao primeiro pico, o qual representa os valores das frequências naturais, apresentada na figura 8.

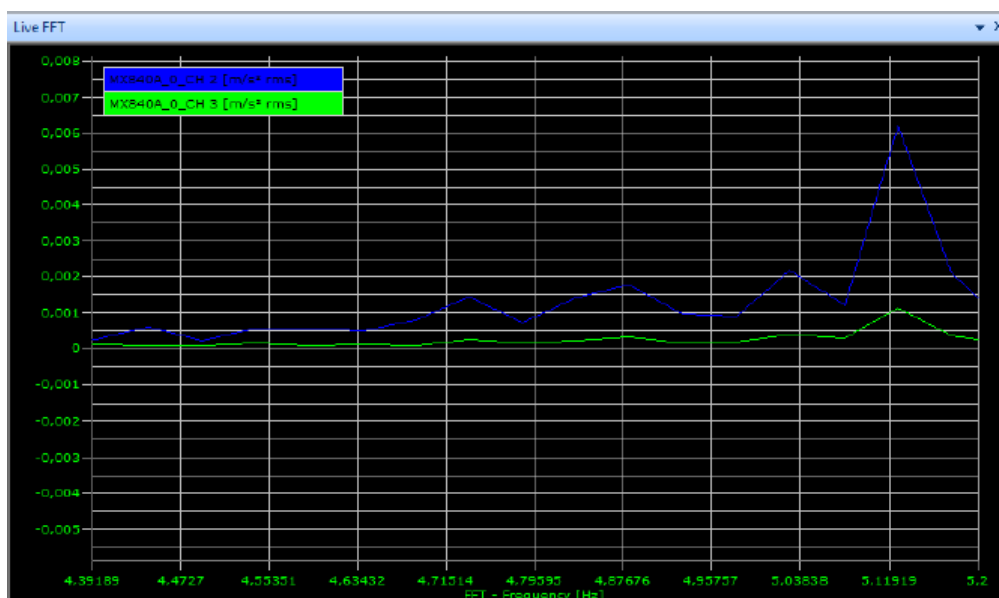


Figura 8: Primeiro ponto - Ampliação de valores de frequência - Acelerômetros 2 e 3 - Sem vazamento associado

Tal processo foi repetido para cada um dos casos de simulação de dano e foi construído uma distribuição com os valores de frequência obtidos nesse primeiro ponto submetido a diferentes graus de vazamento. A reta azul representa o valor da frequência natural do duto sem vazamento associado.

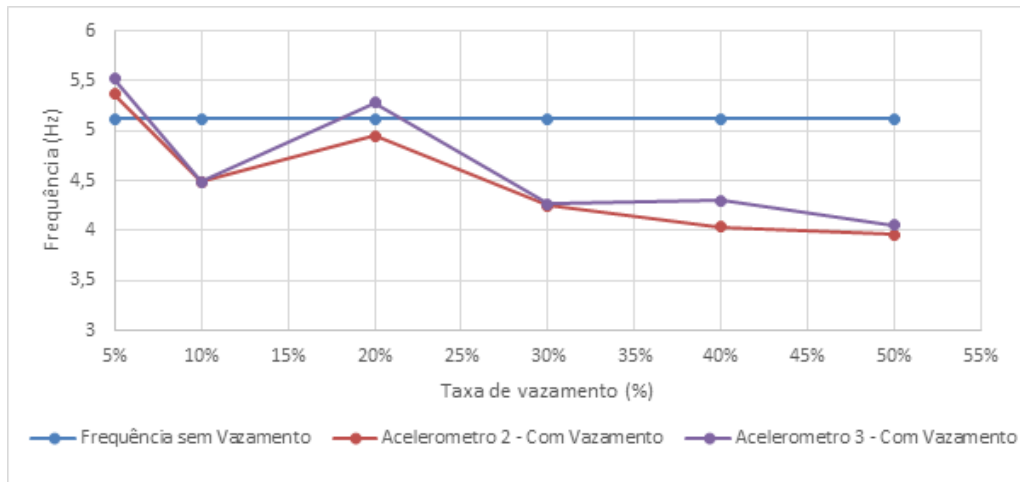


Figura 9: Primeiro ponto - Valores de frequências obtidos ao longo dos ensaios

A partir dos valores obtidos, gerou-se uma tabela com o cálculo dos distanciamentos das frequências medidas para cada uma das simulações de vazamento com relação àquela medida antes das simulações, estes valores são apresentados a seguir:

Tabela 2: Variações de frequência com relação a frequência sem vazamento para o primeiro ponto

Porcentagem de vazamento	Acelerômetro 2	Acelerômetro 3
5%	0,25	0,4
10%	0,63	0,63
20%	0,17	0,16
30%	0,87	0,85
40%	1,08	0,82
50%	1,16	1,07

A verificação e análise do valor da frequência de primeiro modo para cada vazamento simulado faz perceber que é notória a diminuição das frequências a partir da simulação da vazão do vazamento a partir dos 30% da total, o que pode ser justificado pelo alto índice de fluido que é perdido através do dano simulado.

Segundo ponto de vazamento. No segundo caso, o acelerômetro 4 (amarelo) foi posicionado à jusante do ponto de vazamento e o 5 (ciano) à montante.

De forma análoga ao caso anterior, o resultado obtido no software Catman Easy para a distribuição de frequências, sem vazamento, é dado a seguir:

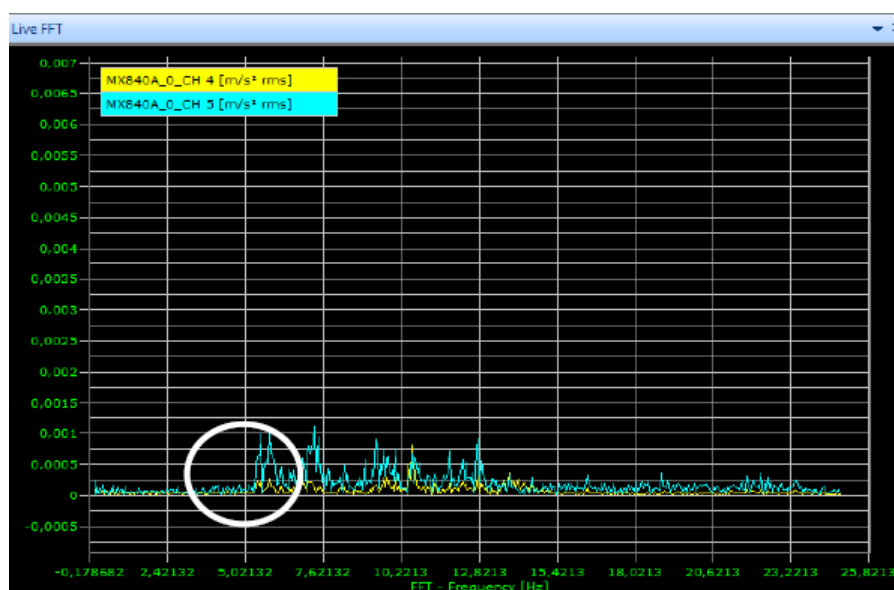


Figura 10: Segundo ponto - Valores de frequência - Acelerômetros 4 e 5 - Sem vazamento associado

E sua ampliação da faixa de frequências para obtenção do valor no primeiro pico:

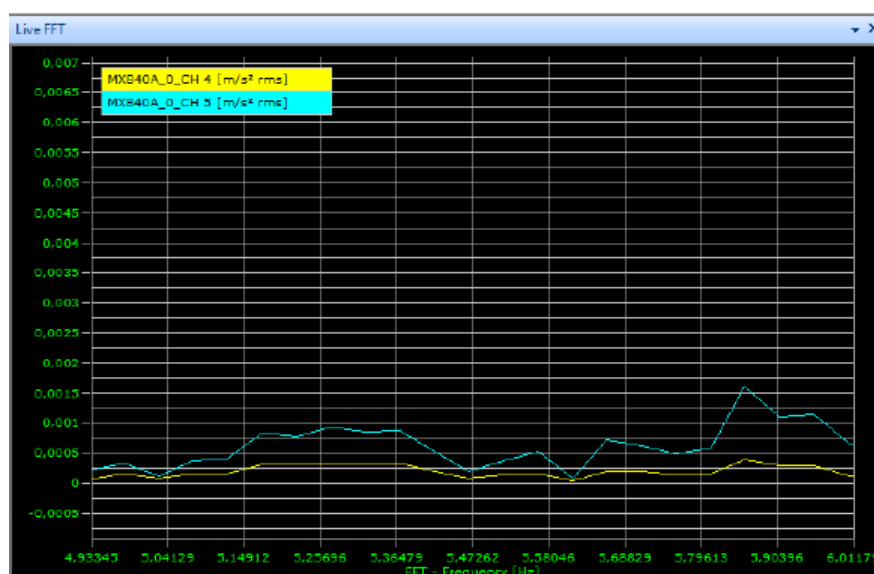


Figura 11: Segundo ponto - Ampliação de valores de frequência - Acelerômetros 4 e 5 - Sem vazamento associado

A seguir a sua distribuição com os valores de frequência obtidos nesse segundo ponto submetido a diferentes graus de vazamento. A reta azul representa o valor da frequência natural do duto sem vazamento associado.

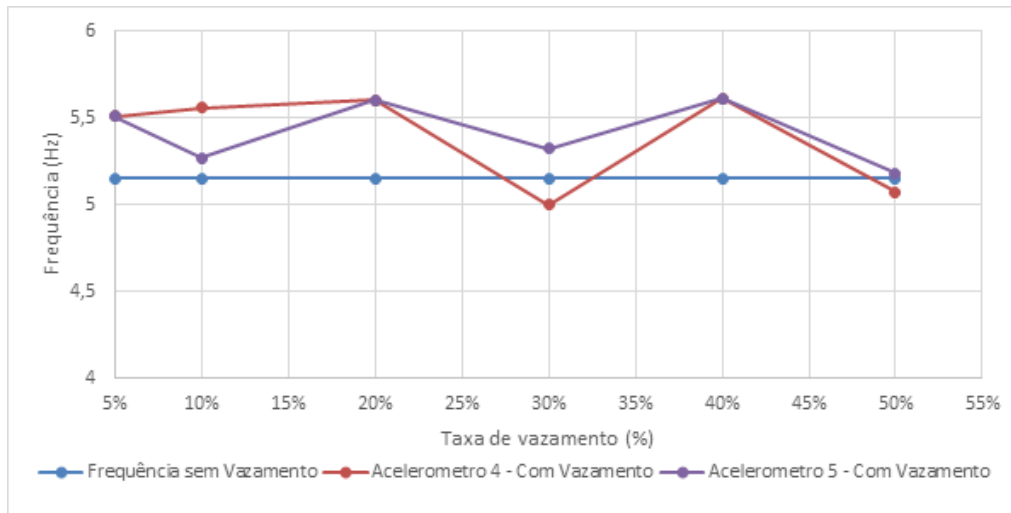


Figura 12: Segundo ponto - Valores de frequências obtidos ao longo dos ensaios

A partir dos valores obtidos, gerou-se, de maneira análoga ao caso anterior, uma tabela com o cálculo dos distanciamentos das frequências medidas para cada uma das simulações de vazamento com relação àquela medida antes das simulações, estes valores são apresentados a seguir:

Tabela 3: Variações de frequência com relação a frequência sem vazamento para o segundo ponto

Porcentagem de vazamento	Acelerômetro 4	Acelerômetro 5
5%	0,36	0,36
10%	0,41	0,12
20%	0,45	0,45
30%	0,15	0,17
40%	0,46	0,47
50%	0,08	0,03

Neste caso, nem com o aumento significativo da vazão do vazamento houve uma diminuição do perfil de vibração medurado pelo sistema de aquisição, o que caracteriza um resultado inconclusivo.

Terceiro ponto de vazamento. No terceiro ponto, o acelerômetro 6 (amarelo) foi posicionado à jusante do ponto de vazamento e o 7 (vermelho) à montante.

O resultado obtido no software Catman Easy para a distribuição de frequências, sem vazamento, é dado a seguir:



Figura 13: Terceiro ponto - Valores de frequência - Acelerômetros 6 e 7 - Sem vazamento associado

E sua ampliação da faixa de frequências para obtenção do valor no primeiro pico:

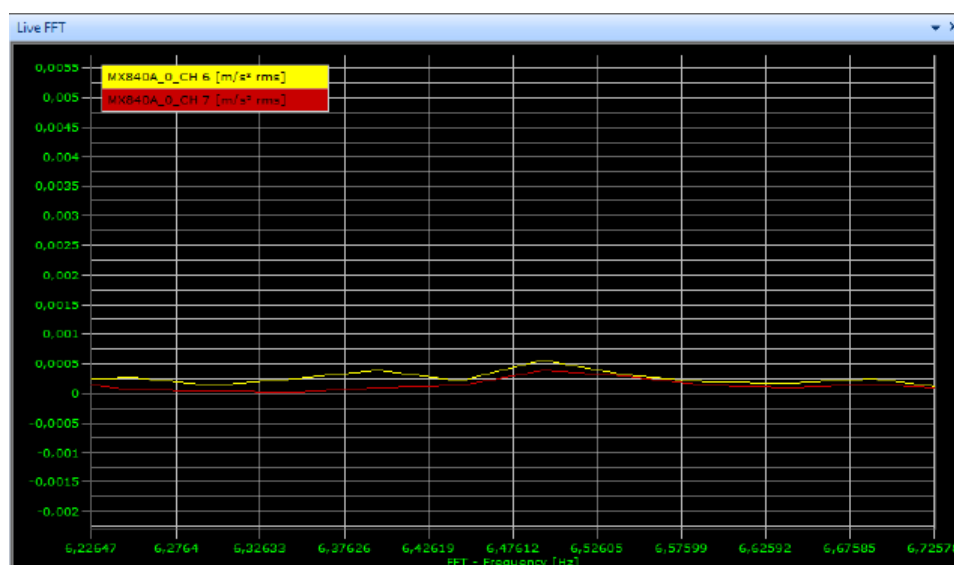


Figura 14: Terceiro ponto - Ampliação de valores de frequência - Acelerômetros 6 e 7 - Sem vazamento associado

E temos sua distribuição com os valores de frequência obtidos nesse segundo ponto submetido a diferentes graus de vazamento. A reta azul representa o valor da frequência natural do duto sem vazamento associado.

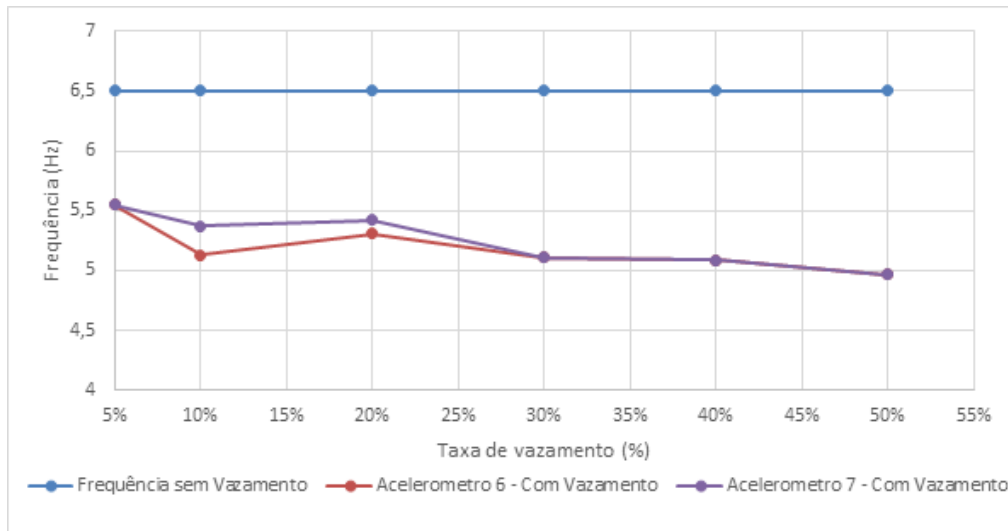


Figura 15: Terceiro ponto - Valores de frequências obtidos ao longo dos ensaios

A partir dos valores obtidos, gerou-se uma tabela com o cálculo dos distanciamentos das frequências medidas para cada uma das simulações de vazamento com relação àquela medida antes das simulações, estes valores são apresentados a seguir:

Tabela 4: Variações de frequência com relação a frequência sem vazamento para o terceiro ponto

Porcentagem de vazamento	Acelerômetro 6	Acelerômetro 7
5%	0,95	0,95
10%	1,37	1,13
20%	1,19	1,08
30%	1,39	1,39
40%	1,41	1,41
50%	1,53	1,53

A verificação e análise do valor da frequência de primeiro modo para cada vazamento simulado faz perceber que os transdutores 6 e 7 foram os que simularam de forma mais adequada a situação do vazamento, segundo o referencial teórico, pois apesar do acelerômetro 7 apresentar valores que frequência maiores que o 6 para o intervalo de vazões do vazamento menores que 20%, estes apresentam valores de frequência menores entre o intervalo de 20 a 50%.

Acredita-se que os valores dos acelerômetros convergiram para o mesmo ponto pela distância dos mesmos ao ponto de vazamento ser curta e que se estes fossem posicionados a uma distância mais expressiva, os valores não seriam tão próximos. Como também que o valor da frequência natural sem vazamento nesta situação foi superior à medida nos outros dois pontos pela configuração de apoio do duto no mesmo, já que este terceiro ponto de vazamento está posicionado em um trecho da tubulação diferente dos outros dois.

3.2 FIXO - LIVRE

De maneira análoga ao caso de simplesmente apoiado foi utilizada a equação de Wachel (1990), porém com um fator de frequência referente à condição fixo livre, $\lambda = 3,52$, E COM O COMPRIMENTO RELATIVO DO TRECHO DO DUTO ENSAIADO, $l = 0,9\text{m}$, para se obter o valor base para análise da frequência nessa disposição dos dutos.

$$f_0 = \frac{\lambda}{2\pi} * \sqrt{\frac{gEI}{\mu l^4}} \rightarrow f_0 = 3,96\text{Hz} \quad (3)$$

O acelerômetro foi posicionado em um extremo da tubulação, distanciado em 0,9m do unico lado com apoio, com o extremo livre em U, conforme a figura 10. Na ausência de vazamento, foi obtido um valor de frequência que foi comparado ao valor base obtido acima.



Figura 16: Esquema de posicionamento dos acelerômetros nas condições fixo - livre e curvatura em U

O resultado obtido no software Catman Easy para a distribuição de frequências é dado a seguir:

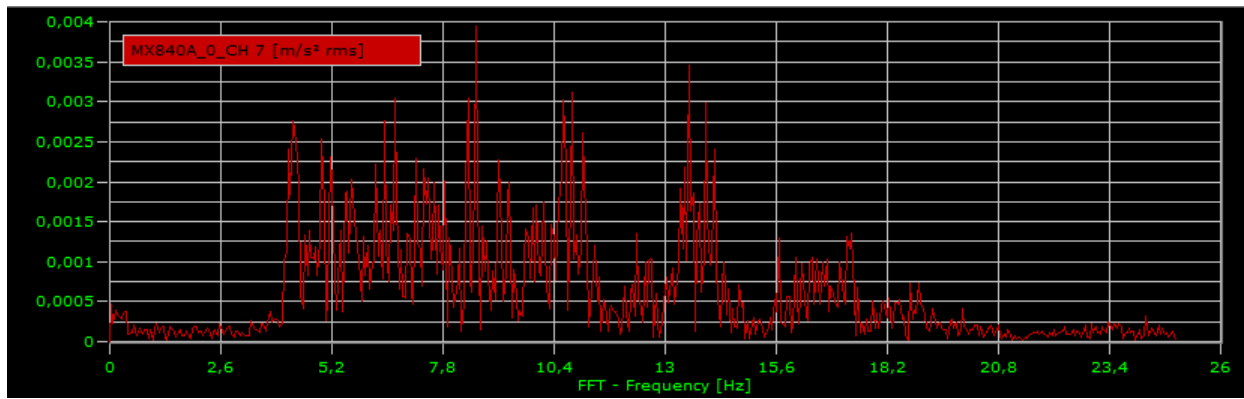


Figura 17: Valores de frequência sem vazamento associado: condição de apoio fixo - livre

Como anteriormente, é ampliado o gráfico para obtenção do valor de frequência no primeiro pico:

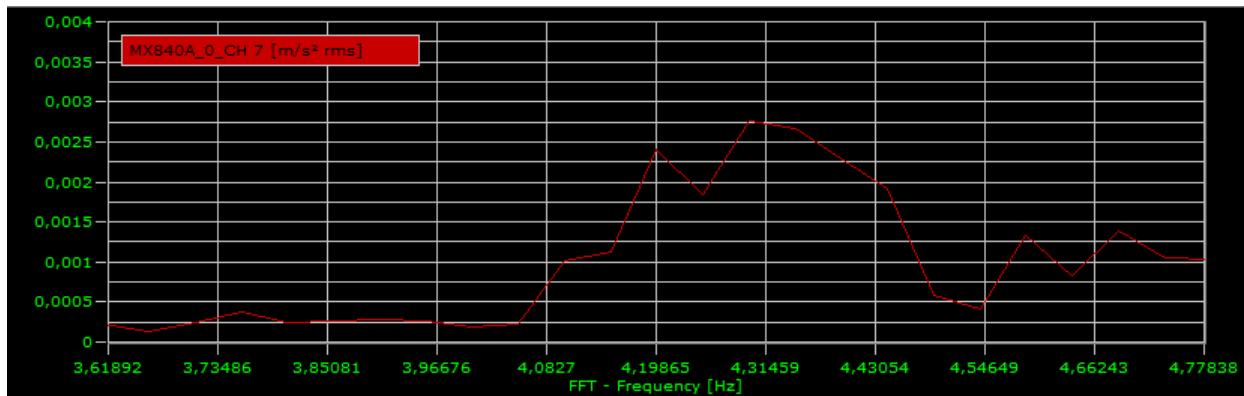


Figura 18: Ampliação de valores de frequência sem vazamento associado: condição de apoio fixo - livre

O valor para a frequência obtido foi de 4,30Hz, o que gera uma variação de frequência com relação à frequência natural obtida pela fórmula de Wachel (1990) de 0,34Hz.

3.3 CURVATURA EM U

Com a equação de Wachel (1990) aplicada à condição de curvatura em U, $\lambda = 18,7$, e com o comprimento relativo do trecho do duto ensaiado, $l = 1,3\text{m}$, temos:

$$f_0 = \frac{\lambda}{2\pi} * \sqrt{\frac{gEI}{\mu l^4}} \rightarrow f_0 = 10,09\text{Hz} \quad (4)$$

O resultado obtido no software Catman Easy para a distribuição de frequências, sem vazamento, é dado pela figura 19. E sua ampliação da faixa de frequências para obtenção do valor no primeiro pico é ilustrado na figura 20.

O valor obtido para a frequência foi de 4,35Hz, o que gera uma variação de frequência com relação à frequência natural obtida pela fórmula de Wachel (1990) de 5,74Hz. Acredita-se que tal diferença venha da não disposição correta da tubulação ensaiada para enquadrar-se no caso de curvatura em U, apesar de ser tal. Isso deve-se ao fato de que para obtenção da mesma foram unidos duas curvas de 90°, o que torna a ligação mais rígida que caso fosse intermediada por uma tubulação.

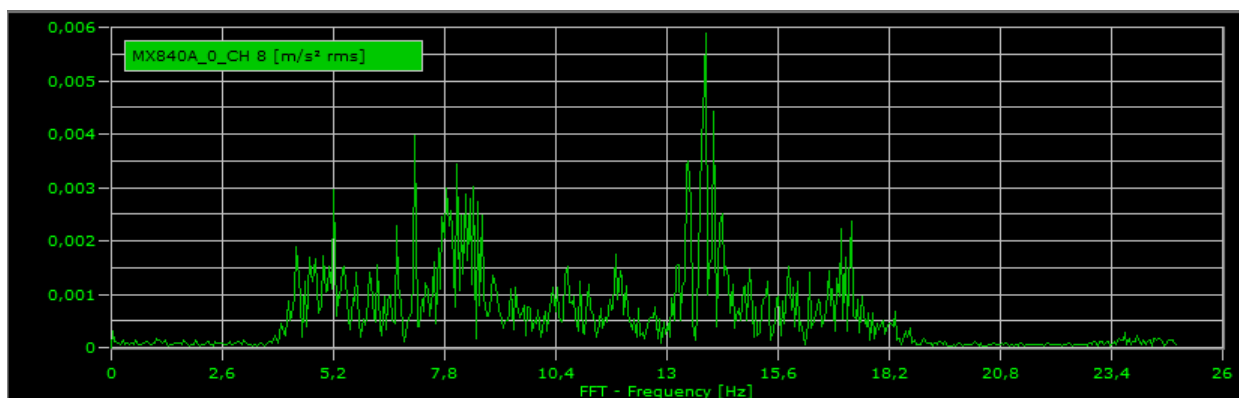


Figura 19: Valores de frequência sem vazamento associado: condição de curvatura em U

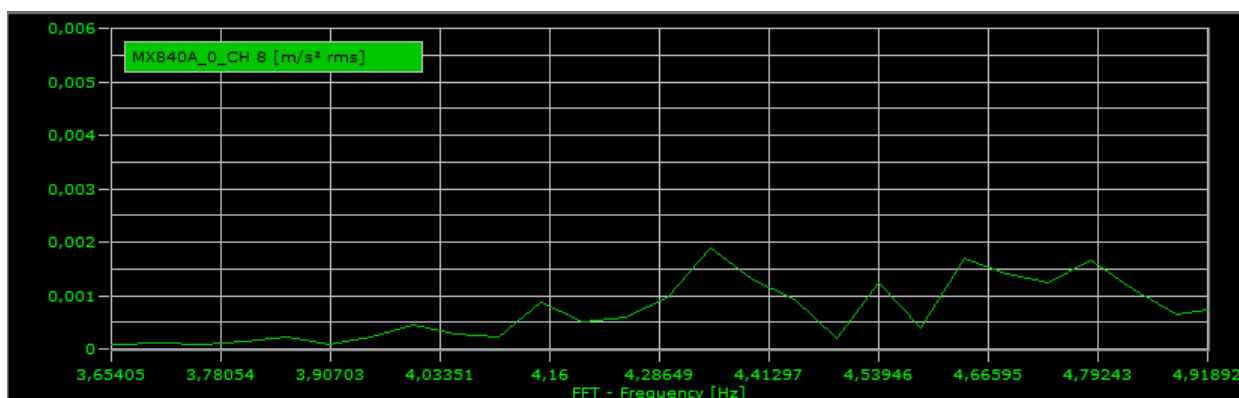


Figura 20: Ampliação de valores de frequência sem vazamento associado: condição de curvatura em U

4 CONCLUSÃO

A modificação do perfil de vibração decorrente da existência de um dano em um duto que realiza o transporte de fluidos é, sem dúvida, um fenômeno que permite a monitoração, identificação e solução do dano em um breve intervalo de tempo. Essa estratégia pode ser de interesse para aplicações em nível industrial, onde tipicamente o custo de reparo em um conduto onde existe vazamento pode não ser muito elevado, mas esta ocorrência sempre acarreta prejuízos significativos devido à interrupção ou redução de operação da unidade afetada, além do potencial risco de grandes impactos ambientais decorrentes do vazamento do fluido conduzido.

A partir dos resultados, podemos perceber que a metodologia realizada possui limitações, visto que uma tendência de aumento da frequência com o aumento da vazão do vazamento não é observada, exceto no terceiro caso. Já com relação aos transdutores utilizados, estes não apresentaram, de maneira geral, desenvolvimento satisfatório na caracterização do perfil de vibração dos dutos ensaiados. Este problema pode ser decorrente da baixa sensibilidade dos transdutores quando comparados com as oscilações dos níveis de frequência presentes na tubulação com a simulação dos vazamentos.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV), e ao projeto SIADU-TOS, que ofereceram todo apoio para realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- Boaratti, M. F. G., 2006. *Modelagem analítica da propagação de ondas de tensão em tubos de parede fina visando a localização de uma fonte pontual harmônica em sua superfície*, Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)/São Paulo.
- Cavalcante, J. R. D., Assis, W. S. A., 2014. *Estudo da integridade de dutos utilizando análise dinâmica*, Monografia. Universidade Federal de Alagoas
- Figueiredo, D. J. F., 2006. *Monitorização e avaliação do comportamento de obras de arte*, Dissertação de Mestrado. Faculdade de engenharia da Universidade do Porto (FEUP)/Porto.
- Silicon designs, Acesso em: 22 de outubro de 2014. *Analog Accelerometer module - Model 2210*. Disponível em: <<http://www.silicondesigns.com>>.
- Wachel, J. C.; Morton, J. S.; Atkins, K. E., 1990. *Piping Vibration Analysis*. Proceedings of 19th Turbomachinery Symposium/Texas.