

Uso da Lógica Paraconsistente Anotada para monitoração de falha por fadiga devido a vibração em tubulações de processos

Use of Paraconsistent Annotated Logic for monitoring of vibration-induced fatigue failure in process piping

DOI:10.34117/bjdv8n8-053

Recebimento dos originais: 21/06/2022

Aceitação para publicação: 29/07/2022

Jose Jefferson Morais de Oliveira

Mestrando em Engenharia Mecânica pela Universidade Santa Cecília (UNISANTA)

Instituição: Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) - Unidade de Negócios de Exploração e Produção da Bacia de Santos

Endereço: Rua Marquês de Herval, 90, Valongo, CEP: 11010-310, Santos - SP

E-Mail: jjmoliveira@petrobras.com.br

João Inácio da Silva Filho

Doutor em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Santa Cecília (UNISANTA) - Laboratório de Lógica Paraconsistente Aplicada (*LaboLPA*)

Endereço: Rua Dr. Cesário da Mota, 8, Bloco F, Sala 84A, Boqueirão, CEP:11045-907, Santos - SP

E-mail: inacio@unisanta.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta alguns conceitos de vibração em tubulações e técnicas de monitoração para mensurar riscos de falha por fadiga, conforme metodologias propostas pelas diretrizes do Energy Institute e da ISO - International Organization for Standardization. Com base nestas duas fontes de informações é investigado um modo de quantificar estes riscos utilizando os conceitos básicos de Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v). Na sequência, a partir de dados reais de medição de vibração em tubulações de uma unidade de compressão (para condições distintas de operação), foi implementada configuração de algoritmos compondo uma Rede de Análise Paraconsistente (RAP), e determinado o valor do Grau de Certeza real resultante. Os resultados obtidos ratificaram a possibilidade de se aplicar este tipo de lógica em redes neurais destinadas a predição de falhas em tubulações por fadiga induzida por vibrações (VIF).

Palavras-chave: Lógica Paraconsistente Anotada, Redes de Análise Paraconsistente, tubulações industriais, fadiga induzida por vibrações.

ABSTRACT

This paper presents some concepts of vibration in piping and monitoring techniques to measure the risk of fatigue failure, according to methodologies proposed by the Energy Institute and ISO - International Organization for Standardization guidelines. Based on these two sources of information, a way to quantify these risks is investigated using the basic concepts of Paraconsistent Annotated Logic with annotation of 2 values (PAL2v). Subsequently, from real vibration measurement data in piping of a compression unit (for

different operating conditions), algorithm configuration was implemented composing a Paraconsistent Analysis Network (PANet), and the Real Certainty Degree Value was determined. The results obtained confirmed the possibility of applying this type of logic in neural networks aimed at predicting failures in piping due to vibration-induced fatigue (VIF).

Keywords: Paraconsistent Annotated Logic, Paraconsistent Analysis Network, process piping, vibration-induced fatigue.

1 INTRODUÇÃO

Problemas de vibrações excessivas em sistemas de tubulações industriais é um fenômeno bastante comum à indústria. Em geral, estas vibrações podem ser causadas por fontes mecânicas (motores, bombas, compressores, base de maquinário ou acoplamento mecânico), ou por fontes hidráulicas (excitações provenientes de pulsações de pressão, turbulência, fluxos bifásicos, cavitações, golpe de aríete, entre outros) [GHAZALI, HEE e LEONG, 2014, pág. 350].

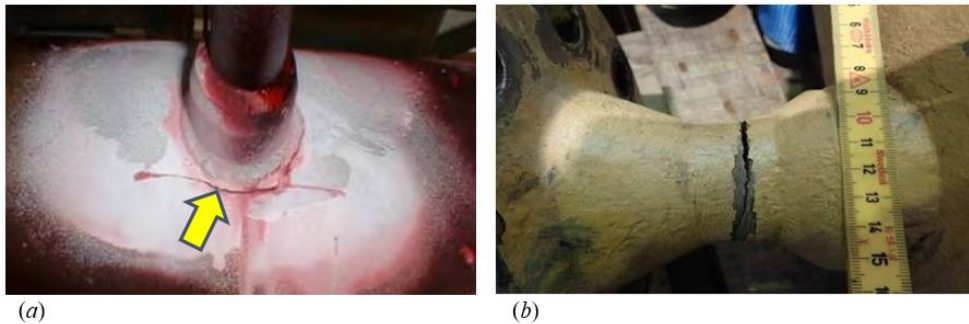
Por sua vez, estas vibrações são responsáveis pelo surgimento do mecanismo de falha por fadiga devido a presença de vibração (do inglês, *vibration-induced fatigue* – VIF). Este mecanismo de dano já é conhecido na indústria de óleo e gás de longa data, conforme Wachel, Morton e Atkins (1990, pág. 119). Estudos mais recentes indicam que, no Mar do Norte, falhas por fadiga devido a vibrações em tubulações de instalações *offshore* respondem por 21% dos vazamentos de hidrocarbonetos em plataformas de produção de petróleo [HSE RR672, 2008; GHAZALI, HEE E LONG, 2014, p. 350; KEPRATE e RATNAYAKE, 2018, p. 1].

O mecanismo de falha por fadiga devido a vibrações, doravante falha VIF, está associada ao surgimento de tensões alternadas, em juntas soldadas de conexões de tubulações que, quando acima de determinados níveis, podem resultar no início e/ou propagação de trincas de fadiga. A propagação destas trincas, se não forem impedidas, levará a fratura da seção da junta soldada [EI GUIDELINES, 2008, p. 14].

Evidentemente, este tipo de falha é altamente indesejável numa plataforma de petróleo, uma vez que a ignição de uma atmosfera rica em hidrocarboneto, poderia ocasionar um evento catastrófico, com perdas econômicas significativas e danos ambientais consideráveis, além de representar uma séria ameaça à segurança do pessoal de bordo. Nas Figuras 1.a e 1.b, observam-se exemplos de falhas em tubulações associadas a fadiga induzida por vibração. Na fotografia da Figura 1.a, identificou-se a

existência de trinca longitudinal (através de inspeção por líquido penetrante – ver seta amarela), localizada numa tubulação próxima a uma derivação. Por sua vez, na fotografia da Figura 1.b, é visível a existência de trinca circunferencial em outra derivação, entre um *weldolet* e um flange pescoço.

Figura 1. Exemplos de falha por fadiga induzida por vibração em sistemas de tubulação industrial: (a) trinca em linha principal próximo a derivação de pequeno diâmetro e (b) trinca em derivação próxima a flange pescoço.



Fonte: Energy Institute (2008, pág. 14) e Momentum Technologies (2017) Disponível em: <https://www.momentum-technologies.no/2017/03/03/pipework-vibration-assessment/>. Acesso em: 30/06/2022.

Com o intuito de mitigar este tipo de falha em tubulações de processo, foram elaboradas diretrizes técnicas que estabelecem critérios de aceitação para os níveis de vibração presentes em equipamentos de processo e tubulações industriais. Tais diretrizes se aplicam à novos projetos, atividades de inspeção, manutenção ou reformas de instalações existentes [EFRC GUIDELINES, 2009; EI GUIDELINES, 2008; ISO 20816-8:2018, 2018].

Estas diretrizes normativas apresentam metodologias próprias para avaliar o risco de falha por fadiga em tubulações de processo, induzidas pela presença de vibração. Para tal, utilizam critérios em função da velocidade de vibração RMS (*root mean square*), atuante num sistema de tubulação, ou um sistema de pontuação (*scoring*), que está associado a probabilidade de falha (LOF), em função das forças de excitação e geometria das linhas. No entanto, como cada diretriz possui critérios distintos, o emprego de duas ou mais diretrizes numa análise, pode-se levar a resultados divergentes ou contraditórios.

Na prática, segundo Medeiros, Mendonça e Tinoco (2020, pág. 2), é usual o emprego da medição da velocidade de vibração RMS em dois níveis distintos de avaliação para intensidade de vibração num sistema de tubulação. O primeiro nível de análise seria através da metodologia proposta pela ISO - International Organization for Standardization (por ser mais fácil de executar) e, caso este indique que a vibração medida

representa um problema para integridade das tubulações de processo, emprega-se a metodologia do EI - Energy Institute como segundo nível de análise. Se esta segunda análise (EI), por sua vez, considerar que a vibração é admissível, o resultado obtido na primeira análise (ISO), será desconsiderado ou expurgado.

Uma vez que numa planta de processo, tubulações industriais interligam grandes máquinas rotativas (como por exemplo: compressores, bombas e turbinas), e que tais máquinas, com o desgaste natural em operação ou com a atuação de determinados mecanismos de danos, tendem a aumentar seu nível de vibração, é natural que o nível de vibrações em tubulações aumente com o tempo de operação da planta. Este comportamento constitui o princípio básico para as técnicas de manutenção preditiva que utilizam a análise de vibração [ARATO JÚNIOR, 2004, pág. 41].

A Lógica Paraconsistente Anotada (LPA) é uma lógica não clássica que suporta a contradição em seus fundamentos permitindo assim o tratamento de dados com informações incertas e contraditórias. Devido a essa propriedade a lógica paraconsistente pode ser aplicada para tratamento de dados complexos, pois, ao contrário da lógica clássica, os seus algoritmos não ignoram ou descartam dados aparentemente contraditórios ou inconsistentes. Conforme já demonstrados em diversos estudos, algoritmos fundamentados na LPA podem ser mais eficientes que os convencionais, pois são capazes de extrair destas contradições informações importantes para a tomada de decisão [ABE, NAKAMATSU, DA SILVA FILHO, 2019, pág. 1175-1181; DA SILVA FILHO, ABE, TORRES, 2008, pág. 40].

O algoritmo denominado Nó de Análise Paraconsistente – NAP, é um dos mais importantes fundamentados em LPA2v. As suas equações permitem que, a partir de dois sinais de informação de valores normalizados, denominados graus de Evidência favorável (μ) e desfavorável (λ) a uma proposição P , que possam conter informações contraditórias, seja obtida na saída grau de Evidência resultante (μ) também normalizado e depurado dos efeitos da contradição. O algoritmo NAP é descrito a seguir:

Apresente os dois valores normalizados provenientes das fontes de informação:

$$\mu_1 \text{ e } \mu_2$$

Calcule o grau de evidência desfavorável:

$$\lambda_I = 1 - \mu_2.$$

Calcule o grau de certeza:

$$G_C = \mu_I - \lambda_I.$$

Calcule o grau de contradição:

$$G_{ct} = (\mu_I + \lambda_I) - 1$$

Calcule a distância D:

$$D = \sqrt{(1 - |G_C|)^2 + G_{ct}^2}$$

Considere a restrição:

Se $D > 1$, então faça $S_I = 0,5 \rightarrow$ *Considere indefinição na saída!*

Se não, vá para o próximo item.

Determine o Grau de Certeza real:

Se $G_C > 0$, Calcule: $G_{CR} = (1 - D)$

Se $G_C < 0$, Calcule: $G_{CR} = (D - 1)$

Calcule o Grau de Evidência resultante:

$$\mu_{ER} = \frac{G_{CR} + 1}{2}$$

Apresente o resultado na saída S₁:

$$\text{Faça } S_1 = \mu_{ER}$$

Fim.

Os algoritmos NAP's podem ser interligados formando redes de análises paraconsistentes.

Na análise do problema de inconsistência dos critérios da ISO e da EI, foi utilizado um a Rede de Análise Paraconsistente (RAP), ilustrada na Figura 2. Trata-se de uma rede de configuração simples, composta por três algoritmos da LPA2v denominado de Nó de Análise Paraconsistente (NAP).

No presente trabalho, será empregado uma Rede de Análise Paraconsistente (RAP), de simples configuração, utilizando a Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v), para o tratamento das incertezas na medição de vibração para um caso real de falha em tubulação de um sistema de compressão conhecido [MEDEIROS, MENDONÇA, TINOCO, 2020, pág. 1-2; OLIVEIRA, PACHECO, 2022, pág. 10833].

Para obtenção e valoração dos dados de entrada, serão utilizados como fontes de informação os critérios do EI e da ISO. Ou seja, será analisado o risco de falha por fadiga induzida por vibrações em tubulações de processo sem, no entanto, ignorar ou refutar eventuais inconsistências nos dados obtidos em campo. O principal objetivo é avaliar o uso da LPA2v para alicerçar um método eficiente de predição de falhas por VIF.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho utiliza-se na investigação um caso real de ocorrência de vibração em sistema de tubulação que veio a falhar por fadiga. A análise é iniciada a partir da análise de vibração em tubulação do sistema de sucção do 2º estágio de uma planta de compressão – que apresentou vibração excessiva na fase de pré partida com falha numa derivação de pequeno diâmetro por fadiga (exigindo alterações no projeto original). Foram registradas as velocidades de vibração antes da falha e após duas modificações de projeto, conforme descrito na Tabela 1. [MEDEIROS, MENDONÇA, TINOCO, 2020, pág. 3-9; OLIVEIRA, PACHECO, 2022, pág. 10832].

Utilizando-se Lógica de Análise Paraconsistente, foi elaborada uma rede de análise simples para determinação do Grau de Evidência real (μ_{ER}), para a proposição P_3 : “Risco de Falha Iminente por VIF”.

Tabela 1 – Valores Máximos Medidos para Vibração na Tubulação do Compressor

Nº	Condição Operacional para Medição	Máxima Velocidade Global RMS Medida [mm/s]	Máxima Velocidade Espectral RMS Medida [mm/s]	Frequência Correspondente à Máxima Veloc. Espectral [Hz]
#1	Durante a Pré Partida da Planta, com a configuração do Projeto Original ¹	104,5	102	30,1
#2	Após Reparo da Tubulação e Instalação de Amortecedores de Alta Viscosidade ²	29	25,8	30
#3	Após Instalação de Amortecedor de Massa Sintonizada Próximo a Região de Máxima Vibração ³	17	9,4	18

Notas:

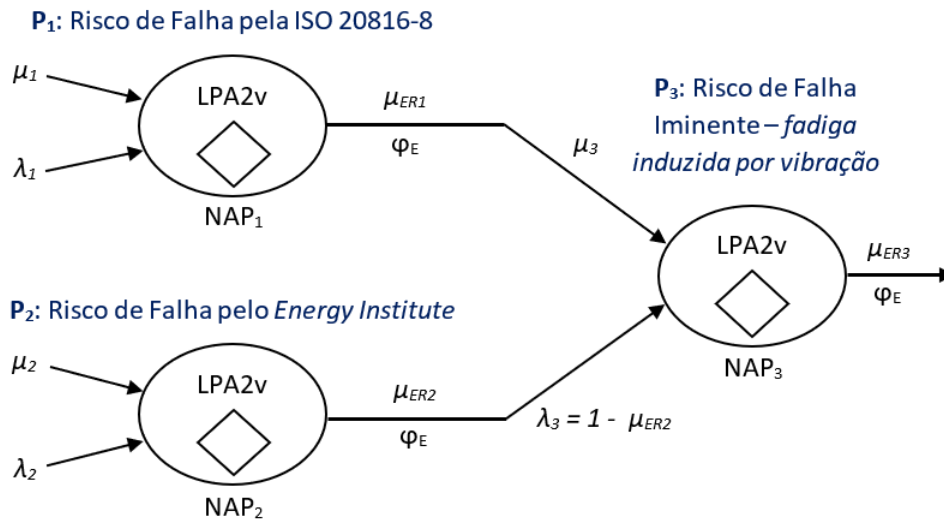
- (1) Antes da falha da tubulação, que ocorreu poucas horas após a partida da planta;
- (2) Primeira medida implementada para supressão da vibração na tubulação;
- (3) Segunda medida implementada para supressão da vibração na tubulação.

Fonte: Oliveira, Pacheco (2022, pág. 10833).

Para o sistema de tubulação em análise, foi considerado que o mesmo se encontrava sujeito a excitações de natureza harmônica, devido a operação de compressor alternativo de grande porte. A faixa de frequência de resposta esperada variava entre 10 e 200 Hz.

Na análise do problema de inconsistência dos critérios da ISO e da EI, foi utilizado um a Rede de Análise Paraconsistente (RAP), ilustrada na Figura 2. Trata-se de uma rede de configuração simples, composta por três algoritmos Nós de Análise Paraconsistente (NAP's). O primeiro algoritmo NAP₁ recebeu os Graus de Evidência favorável e desfavorável (μ_1 e λ_1 , respectivamente), oriundos do critério adotado pela ISO 20816-8. Por sua vez, o NAP₂ recebeu os Graus de Evidência favorável e desfavorável (μ_2 e λ_2 , respectivamente), provenientes do critério adotado pelo EI. Cada um destes NAP's, resultaram num valor de Grau de Certeza real G_{CR} , que sua por sua vez, foram convertidos em Graus de Evidência Resultante real μ_{ER} . Finalmente, os Graus de Evidências resultantes foram utilizados como sinal de entrada para o NAP₃.

Figura 2 - Rede de Análise Paraconsistente de Configuração Simples composta de 3 algoritmos NAP's.



Fonte: Adaptado de Da Silva Filho, Abe, Torres (2008, pág. 102).

Para valoração dos Graus de Evidência do NAP₁, foram considerados, como padrão, os valores disponíveis na ISO (2018, pág. 12), na *Table 3* e na *Figure B.5* – ambos reproduzidas abaixo como Figuras 3 e 4, respectivamente.

Figura 3 – Valores para Velocidade de Vibração Global para sistema de compressão alternativo. Em destaque, valores para tubulações principais.

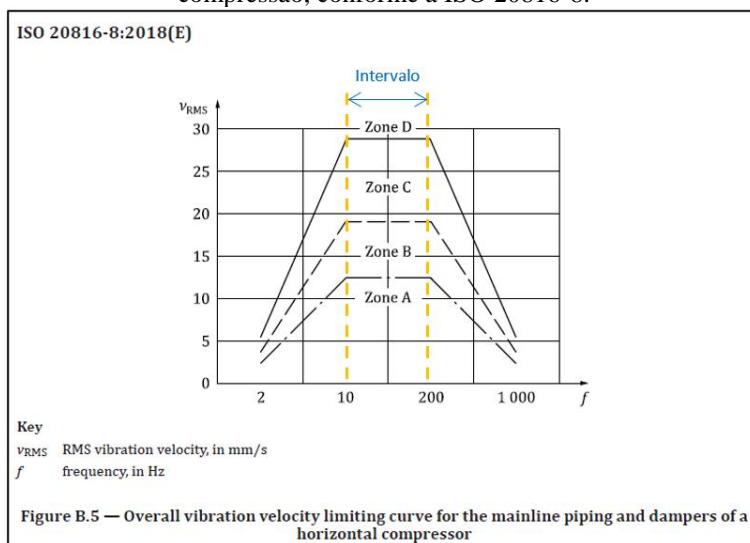
Table 3 — Summary of overall constant vibration velocity values for different compressor system parts

Compressor system part	RMS vibration velocity values for horizontal compressors mm/s			RMS vibration velocity values for vertical compressors mm/s		
	Evaluation zone boundary			Evaluation zone boundary		
	A/B	B/C	C/D	A/B	B/C	C/D
Foundation	2,0	3,0	4,5	2,0	3,0	4,5
Frame (top)	5,3	8,0	12,0	5,3	8,0	12,0
Cylinder (lateral)	8,7	13,0	19,5	10,7	16,0	24,0
Cylinder (rod)	10,7	16,0	24,0	8,7	13,0	19,5
Dampers	12,7	19,0	28,5	12,7	19,0	28,5
Mainline piping	12,7	19,0	28,5	12,7	19,0	28,5
Small bore connection	See Table E.3					

NOTE For mainline piping vibration values above evaluation zone boundary C/D, see Table 1, Note 3.

Fonte: ISO (2018, pág. 12).

Figura 4 – Limites para Velocidades de Vibração Global RMS (mm/s), para tubulações em sistemas de compressão, conforme a ISO 20816-8.



Fonte: ISO (2018, pág. 12).

De acordo com as Figuras 3 e 4, o critério da ISO estabelece quatro zonas de avaliação (de A à D). As zonas A e B são consideradas aceitáveis, enquanto a zona C é considerada marginal (e que merece atenção). Por sua vez, a Zona D representa uma condição de operação inaceitável, devido ao nível de vibração presente, requerendo correção urgente e que não descarta a parada da planta industrial [MEDEIROS, MENDONÇA e TINOCO, 2020, pág. 2].

Para a faixa de frequência de resposta arbitrada, ou seja, variando de 10 a 200 Hz, a zona D é delimitada para um valor de velocidade de vibração constante e igual à 28,5 mm/s. Velocidades abaixo de 19 mm/s são aceitáveis, correspondem à condição admissível de operação, sendo que, uma velocidade de vibração em torno de 12,7 mm/s representaria uma referência de engenharia para uma condição desejável de projeto (condição de novo ou na partida da planta).

Desta forma, para normalização da velocidade de vibração RMS Global como Grau de Evidência favorável (μ_I) para o NAP₁, foram adotadas as relações apresentadas na Tabela 2.

Para determinação do Grau de Evidência desfavorável (λ_I), o mesmo foi obtido através da Equação 1 [DA SILVA FILHO, ABE, TORRES, 2008, pág. 40-83]:

$$\lambda_1 = 1 - \mu_{1b} \tag{1}$$

Sendo μ_{1b} a valoração do Grau de Evidência favorável para NAP₁, similar à μ_1 , mas considerando que o incremento é não linear (em forma da função S), e que já tem início a partir de 12,7 mm/s, já que esta seria a velocidade de vibração na condição de projeto (ou seja, novo, não degradado). Assim, para a normalização de μ_{1b} , que será utilizado na definição de λ_1 , foi definida pelas relações apresentadas na Tabela 3.

Tabela 2 – Valoração de μ_1

Velocidade de Vibração Global RMS [mm/s]	Grau de Evidência favorável para NAP ₁
Global < 19	$\mu_1 = 0$
$19 \leq \text{Global}^1 \leq 28,5$	$\mu_1 = (\text{Global} - 19) / (28,5 - 19)$
Global > 28,5	$\mu_1 = 1$

Nota:

1) Para valoração entre 0 e 1, considerou-se uma modelagem com variação linear.

Tabela 3 – Valoração de μ_{1b}

Velocidade de Vibração Global RMS [mm/s]	Grau de Evidência favorável para NAP ₁
Global < 12,5	$\mu_{1b} = 0$
$12,5 \leq \text{Global}^1 \leq 23,7$	$\mu_{1b} = 2 \times [(\text{Global} - 23,7) / (28,5 - 12,7)]^2$
$23,7 < \text{Global}^1 \leq 28,5$	$\mu_{1b} = 1 - 2 \times [(\text{Global} - 28,5) / (28,5 - 12,7)]^2$
Global > 28,5	$\mu_{1b} = 1$

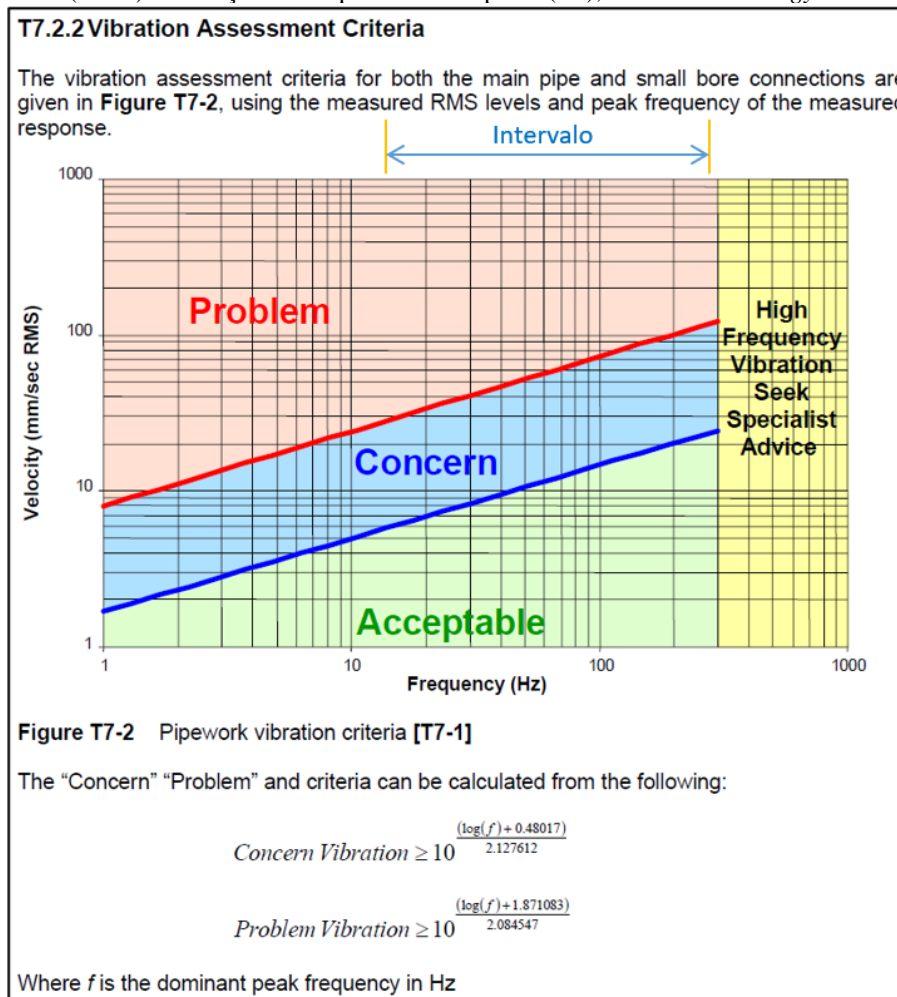
Notas:

(1) Para valoração entre 0 e 1, considerou-se uma modelagem com variação não linear, em forma da função S.

No caso da valoração dos Graus de Evidências favorável e desfavorável (μ_2 e λ_2 , respectivamente), para o nó NAP₂, utilizou-se como padrão, o critério de análise do *Energy Institute*, representado em forma gráfica em *Figure T7-2*, conforme EI (2008, pág. 117), e que no presente trabalho encontra-se ilustrado na Figura 5.

E, de acordo com a Figura 5, conforme critério da EI, a valoração será função da frequência de resposta medida (dentro do intervalo de frequência arbitrado), sendo que, abaixo da reta azul, o nível de vibração é aceitável e, acima da curva vermelha, tem-se a região denominada de “Problema”, com elevado risco de ocorrer falha por fadiga. Nestes casos, medidas de monitoramento e controle de vibração devem ser, imediatamente, implementadas [EI, 2008, pág. 114-118].

Figura 5 – Critérios de avaliação de vibração para sistemas de tubulação, com velocidades de vibração RMS (mm/s) em função da frequência de resposta (Hz), conforme o *Energy Institute*.



Fonte: EI (2008, pág. 117).

Ainda, de acordo com a Figura 5, a região denominada de “Preocupação”, encontra-se delimitada pelas Equações 2 e 3, a seguir:

$$\text{Preocupação com Vibração} \geq 10^{\frac{(\log(f) + 0,48017)}{2,127612}} \quad (2)$$

$$\text{Problema de Vibração} \geq 10^{\frac{(\log(f) + 1,871083)}{2,084547}} \quad (3)$$

Sendo f o valor da frequência do pico dominante, em Hz.

Para valoração do Grau de Evidência favorável μ_2 , para o nó NAP₂, foram adotadas as seguintes relações, a partir do critério da EI, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Valoração de μ_2

Velocidade de Vibração RMS [mm/s]	Grau de Evidência favorável para NAP ₁
RMS < Equação 2	$\mu_2 = 0$
Equação 2 ≤ RMS < Equação 3	$\mu_2 = \frac{(RMS - \text{Equação 2})}{(\text{Equação 3} - \text{Equação 2})}$
RMS ≥ Equação 3	$\mu_2 = 1$

No caso do Grau de Evidência desfavorável λ_2 , para o nó NAP₂, foi considerado o conceito de LOF do EI. Assim, para a configuração geométrica da derivação da tubulação em estudo (*weldolet*), de acordo com o EI (2008, pág. 73-80), LOF para conexão é igual a 0,66 (considerou-se que probabilidade de falha na derivação é dominada, apenas, pela geometria devido a elevada fonte de excitação). E, da Equação 4:

$$\lambda_2 = 1 - \frac{(LOF - 0,4)}{(0,7 - 0,4)} \quad (4)$$

A Equação 4 define Grau de Evidência desfavorável λ_2 , quando a probabilidade de falha na conexão de derivação LOF $\in [0,4; 0,7]$.

Para o cálculo dos Graus de Evidência real μ_{ER1} e μ_{ER2} , que foram utilizados como sinal de entrada para o nó NAP₃, foi necessário determinar os Graus de Certeza G_C , os Graus de Contradição G_{ct} e os Graus de Certeza real G_{CR} .

Estes graus foram determinados a partir dos Graus de Evidência favorável e desfavorável μ e λ , respectivamente, através das Equações 5 a 9, listadas abaixo:

$$G_C = \mu - \lambda \quad (5)$$

$$G_{ct} = \mu + \lambda - 1 \quad (6)$$

$$D = \sqrt{(1 - |G_C|)^2 + G_{ct}^2} \quad (7)$$

$$G_{CR} = (1 - D), \text{ se } G_C > 0 \quad (8)$$

$$G_{CR} = (D - 1), \text{ se } G_C < 0 \quad (9)$$

Sendo D uma reta que vai do ponto de máximo Grau de Certeza V no reticulado, até um ponto de interpolação dado pelo para (G_C, G_{ct}) , no reticulado representativo da LPA2v.

Então, calculou-se o Grau de Evidência real μ_{ER} , através da Equação 10, para os algoritmos NAP₁ e NAP₂:

$$\mu_{ER} = \frac{G_{CR} + 1}{2} \quad (10)$$

Para a determinação do Grau de Evidência real resultante μ_{ER3} , obtido pelo último nó da RAP (conforme configuração da Rede de Análise Paraconsistente representada na Figura 2), foram utilizados os Graus de Evidência favoráveis μ_{ER1} e μ_{ER2} , para determinação do sinal de entrada no NAP₃, conforme Equações 11 e 12:

$$\mu_3 = \mu_{ER1} \quad (11)$$

$$\lambda_3 = 1 - \mu_{ER2} \quad (12)$$

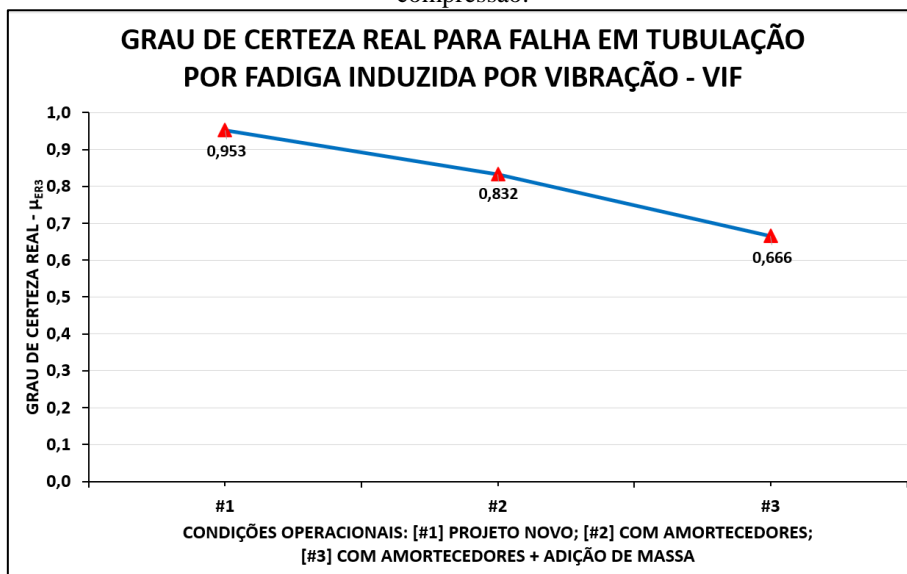
A partir dos valores obtidos para μ_3 e λ_3 , calculou-se os graus G_{C3} , G_{ct3} , G_{CR3} pelas Equações 5 a 9, e através da Equação 10, calculou-se, finalmente, o valor de μ_{ER3} .

3 RESULTADOS

Para os resultados de medição de vibração, utilizados como dados de entrada (conforme Tabela 1), e de acordo com o que foi exposto acima, foram obtidos os valores de μ_{ER3} para a Rede de Análise Paraconsistente da Figura 2, representados no gráfico ilustrado da Figura 6.

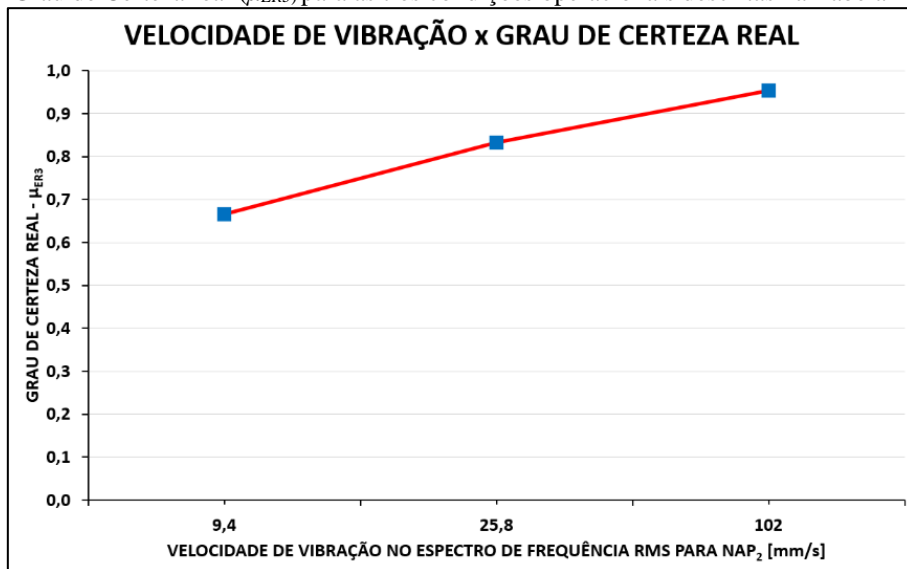
É importante ressaltar que tanto os amortecedores viscoelásticos (*high viscous dampers*), quanto a adição de massa tonada (de ajustagem) tinha como objetivos reduzir o nível de vibração da tubulação, uma vez que na pré partida da planta (condição de “projeto novo”), foram identificadas elevadas velocidades de vibração, conforme indicado na Tabela 1.

Figura 6 – Grau de Certeza real para as três condições operacionais descritas na Tabela 1, para a proposição “Risco de Falha Iminente por VIF” da tubulação de sucção do segundo estágio da unidade de compressão.



Na Figura 7 pode se observar a relação da velocidade de vibração no espectro de frequência em RMS [mm/s] para o NAP₂ com o Grau de Certeza real μ_{ER3} para a Rede de Análise Paraconsistente da Figura 2. Comportamento similar ocorre com a velocidade global em RMS.

Figura 7 – Relação da velocidade de vibração no espectro de frequência em RMS para o NAP₂ com o Grau de Certeza real (μ_{ER3}) para as três condições operacionais descritas na Tabela 1.



5 DISCUSSÃO

É possível identificar, através da Figura 6, que o Grau de Certeza real resultante (μ_{ER3}), obtido pela Rede de Análise Paraconsistente proposta, reflete as ações adotadas para redução do nível de vibração da unidade de compressão, quando comparamos os cenários #2 e #3 com o cenário #1. Observa-se que, à medida em que foram instalados amortecedores viscoelásticos na tubulação (cenário #2) e, em seguida, a adição de massa tonada no trecho da tubulação de maior intensidade de vibração (cenário #3), a tubulação respondeu com menor velocidade de vibração e o Grau de Certeza real para a proposição “Risco de Falha Iminente por VIF” da tubulação foi reduzido. Ou seja, para uma menor vibração foi observado um menor risco de falha.

Desta forma, percebe-se que é possível estabelecer uma escala de pontuação para os valores de μ_{ER3} , com o objetivo de se definir um intervalo em que a proposição é verdadeira – por exemplo, para a $\mu_{ER3} \geq 0,8$.

É importante ressaltar que, de acordo com Oliveira, Pacheco (2022, pág. 6), para o cenário #3, o nível de vibração foi considerado seguro para a metodologia da ISO. Já para o EI, o nível de vibração medido ainda era preocupante (o que aponta para uma inconsistência entre os dois critérios). Considerando-se o Grau de Certeza real resultante para esta condição operacional, obteve-se um valor de $\mu_{ER3} = 0,666$. Assim, neste caso, pode-se definir uma região em que será necessário maior atenção, com monitoramento sistemático, a fim de se evitar a falha. Tanto o critério do EI quanto o da ISO, já estabelecem uma região marginal, para monitoramento. Porém, para este exemplo específico (cenário #3), cada critério chegou a conclusões diferentes. A RAP proposta permitiu integrar os dois critérios (EI e ISO), uma vez que a LPA é capaz de suportar este tipo de inconsistências.

Na Figura 7, pode-se ainda, observar a relação entre a velocidade de vibração e o Grau de Certeza real, onde um incremento da primeira irá resultar no aumento da segunda, já que maiores velocidades de vibração favorecem o mecanismo de falha por fadiga induzida por vibração.

6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados no presente artigo, verifica-se que é possível utilizar os algoritmos da LPA2v para configurar redes de análises paraconsistentes formatada a partir de diretrizes de vibração para sistemas de tubulações em unidades de processo, com o objetivo de associar o nível de vibração presente ao risco

de falha por VIF. Assim, os resultados obtidos neste trabalho dão suporte para a criação de uma RAP de maior complexidade composta de células detectivas, a qual, por exemplo, poderia ser útil na predição de quando o nível de vibração assumiria valores inadmissíveis para um dado sistema de tubulação. A detecção dos níveis de risco de fadiga por vibrações ofereceria condições para que as equipes de manutenção se antecipassem ao evento, de forma a minimizar os impactos decorrentes deste importante tipo de falha.

REFERÊNCIAS

ABE, J. M., NAKAMATSU, K., DA SILVA FILHO, J. I. **Three Decades of Paraconsistent Annotated Logics: A Review Paper on Some Applications**. In: 23rd International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems. Procedia Computer Science, v. 159, pág. 1175-1181. 2019.

ARATO JÚNIOR, A. **Manutenção Preditiva – Usando Análise de Vibrações**. Barueri: Ed. Manole, 2004, 190 p.

DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M.; TORRES, G. L. **Inteligência Artificial com as Redes de Análises Paraconsistentes – Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2008, 313 p.

EFRC GUIDELINES. **Guidelines for Vibrations in Reciprocating Compressor Systems**. European Forum Reciprocating Compressors (EFRC), 3th Edition. Dresden, 2009, 30 p.

EI GUIDELINES. **Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Processo Pipework**. The Energy Institute / HSE – Health and Safety Executive, 2nd Edition. Londres, 2008, 236 p.

GHAZALI, M. H.; HEE, L. M.; LEONG, M. S. **Piping Vibration due to Pressure Pulsations: Review**. In: Advanced Materials Research, v. 845, pág. 350-354, 2014.

HSE RR672. **Research Report N° RR672: Offshore Hydrocarbon Releases 2001-2008**. HSE – Health and Safety Executive, Buxton, 2008, 80 p. Disponível em: <<https://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr672.htm>> Acesso em: 20 abr. 2021.

ISO 20816-8: 2018. **Mechanical Vibration – Measurement and Evaluation of Machine Vibration – Part 8: Reciprocating Compressor Systems**. International Organization for Standardization, Switzerland, 2018, 42 p.

KEPRATE, A., RATNAYAKE, R. M. C. **Generic Approach for Risk Assessment of Offshore Piping Subjected to Vibration Induced Fatigue**. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering, v. 4, 021006: 1-12. Junho de 2018.

MEDEIROS, J.; MENDONÇA, C.O.; TINOCO, E.B. **Dynamic Analysis of a Reciprocating Compressor Piping System**. In: Rio Oil & Gas Expo Conference 2020; 30 Nov. a 03 Dez.: Rio de Janeiro: IBP; FM 3808 00: 1-10.

OLIVEIRA, J. J. M.; PACHECO, M. T. T. **A Análise de Vibração em Tubulações de Processo e o Emprego de Diretrizes Normativas na Prevenção de Falha por Fadiga Associada a FIV: Estudo de Caso**. BJD, v.8, n.2, p. 10830-10837. Curitiba, Fev. 2022. doi: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n2-158>.

WACHEL, J. C.; MORTON, S. J.; ATKINS, K. E. **Piping Vibrations Analysis**. In: Proceedings of the Nineteenth Turbomachinery Symposium, Texas, pág. 119-134, 1990. Disponível em: <<https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/163563>> (Texas A&M University Libraries). Acesso em: 26 nov. 2020.