



UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOSE JEFFERSON MORAIS DE OLIVEIRA

**PREDIÇÃO DE FALHAS EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS DE
PROCESSO SUBMETIDAS A VIBRAÇÃO ATRAVÉS DO USO
DA LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA COM
ANOTAÇÃO DE DOIS VALORES – LPA2v**

SANTOS/SP

2022

JOSE JEFFERSON MORAIS DE OLIVEIRA

**PREDIÇÃO DE FALHAS EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS DE
PROCESSO SUBMETIDAS A VIBRAÇÃO ATRAVÉS DO USO
DA LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA COM
ANOTAÇÃO DE DOIS VALORES – LPA2v**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. João Inácio da Silva Filho e coorientação do Prof. Dr. Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues.

SANTOS/SP

2022

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

511.31 Oliveira, Jose Jefferson Moraes de.

047p Predição de Falhas em Tubulações Industriais de Processo Submetidas a Vibração Através do Uso da Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de Dois Valores - LPA2v / Jose Jefferson Moraes de Oliveira.
-- 2022.
136 p.

Orientador: Prof. Dr. João Inácio da Silva Filho.
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2022.

1. Lógica Paraconsistente Anotada. 2. Rede de Análise Paraconsistente. 3. Tubulações de Processo. 4. Falha por Fadiga Induzida por Vibração. I. Da Silva Filho, João Inácio, orient. II. Rodrigues, Carlos Eduardo Aguiar Lima, coorient. III. Predição de Falhas em Tubulações Industriais de Processo Submetidas a Vibração Através do Uso da Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de Dois Valores - LPA2v.

DEDICATÓRIA

*Dedico este humilde trabalho ao Deus
Altíssimo – Deus criador e Deus remidor;
Àquele que é o doador de toda ciência e
sabedoria; revelador de toda verdade.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Santa Cecília, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNISANTA – PPGEMEC, que pela dedicação dos seus professores e funcionários, me permitiram a conclusão de mais um ciclo de qualificação profissional.

Agradeço ao Professor Dr. João Inácio da Silva Filho, pelas memoráveis aulas de Lógica Paraconsistente Anotada, pelo conhecimento transmitido, pela paciência e pelo privilégio de ser seu orientando ao longo da presente dissertação de mestrado.

Agradeço, também, à Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS, pelas inúmeras oportunidades concedidas que tanto me permitiram crescer como pessoa e como profissional.

Agradeço, ainda, ao colega de trabalho e Professor Dr. Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues, pela revisão do texto referente a vibrações em tubulações industriais e a falha por Fadiga Induzida por Vibração.

Por último, e não menos importante, agradeço ao meu Deus – sem Ele, nada disso seria possível¹, e à minha família – por tamanha inspiração, incentivo e compreensão.

¹ “*Porque Deus é quem efetua em vocês tanto o querer como o realizar, segundo sua boa vontade*”. Filipenses 2:13 (NA).

Ó profundidade da riqueza, tanto da sabedoria como do conhecimento de Deus! Quão inexplicáveis são os seus juízos, e quão insondáveis são os seus caminhos! “Pois quem conheceu a mente do Senhor? Ou quem foi o seu conselheiro? Ou quem primeiro deu alguma coisa a Deus para que isso lhe seja restituído?” Porque dele, e por meio dele, e para ele são todas as coisas. A ele seja a glória para sempre. Amém!

Romanos 11.33-36 (NA)

“Que eu te conheça, ó conhecedor de mim, que eu te conheça, tal como sou conhecido por ti”.

Agostinho de Hipona – Confissões – Livro X

RESUMO

Vibrações excessivas em tubulações industriais de processo promovem o mecanismo de dano conhecido como Fadiga Induzida por Vibração (VIF), que é a principal causa de vazamentos de hidrocarbonetos, paradas operacionais, incêndios e explosões em refinarias, plantas petroquímicas, estações de compressão de gasodutos e plataformas de petróleo. Com o intuito de minimizar tais problemas, diretrizes específicas foram elaboradas – dentre elas a do Energy Institute, para suporte técnico em atividades de novos projetos, inspeção e manutenção de plantas de processos na indústria de petróleo. O presente trabalho, introduz o problema de vibrações em tubulações de processos para unidades de compressão, dotadas de compressores alternativos, juntamente com um método algorítmico de previsão que utiliza conceitos da Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de Dois Valores – LPA2v. A partir de dados reais para uma falha por VIF em uma planta de processo da indústria de óleo e gás, foi realizada uma simulação computacional através do software CAESAR II®, para se determinar valores para máxima velocidade de vibração em um sistema de tubulação. Com as informações obtidas na simulação, uma Rede de Análise Paraconsistente foi proposta para receber sinais de duas fontes de informação diferentes (a máxima velocidade de vibração RMS e o parâmetro de probabilidade de falha proposto pelo Energy Institute – LOF). Verificou-se que foi possível, através do uso da LPA2v, monitorar a evolução do risco de falha e apresentar uma predição de falha por VIF para o sistema de tubulação analisado.

Palavras-Chave: Lógica Paraconsistente Anotada, Rede de Análise Paraconsistente, Tubulações de Processo, Falha por Fadiga Induzida por Vibração.

ABSTRACT

Excessive vibrations in process piping promote the damage mechanism called vibration-induced fatigue (VIF), which is the main cause of hydrocarbon leaks, operational shutdowns, fires and explosions in refineries, petrochemical plants, gas pipeline compressor station and oil platforms. In order to minimize such problems, specific guidelines were developed – for example: Energy Institute's guidelines for supporting activities of new design, inspection, and maintenance of process plants. The present work introduces the problem of vibrations in process pipelines for compression units, equipped with reciprocating compressors, together with an algorithmic prediction method that uses the concepts of Paraconsistent Annotated Logic with Annotation of Two Values – PAL2v. From real data for a failure by VIF in a process plant of the oil and gas industry, a computer simulation was performed using the CAESAR II® software, to determine values for maximum vibration velocity in a piping system. With the information obtained in the simulation, a Paraconsistent Analysis Network was proposed to receive signals from two different information sources (the maximum vibration velocity RMS and the "*likelihood of failure*" parameter proposed by the Energy Institute – LOF). It was verified that it was possible, through the use of the PAL2v, to monitor the evolution of the failure risk and present a failure prediction by VIF for the analyzed piping system.

Keywords: Paraconsistent Annotated Logic, Paraconsistent Analysis Network, Process Piping, Failure Due Vibration-Induced Fatigue (VIF).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de Vibração em Sistema Massa-Mola Simples.....	20
Figura 2 - Desenho Esquemático de Sistema de Tubulação.	22
Figura 3 - Cadeia para Falha por Fadiga Induzida por Vibração.....	23
Figura 4 - Taxonomia da Fadiga em Tubulações de Processo.	25
Figura 5 - Critérios de Aceitação de Vibração em Sistemas de Tubulação.....	30
Figura 6 - Curvas Limites para Velocidade de Vibração de acordo com a ISO.	32
Figura 7 - Comparação da Amplitude do Deslocamento, Velocidade e Aceleração.....	33
Figura 8 - Reticulado Finito de Hasse com Anotações da LPA2v.....	35
Figura 9 - Reticulado Representativo da LPA2v.	37
Figura 10 - Representação no Reticulado do Intervalo de Certeza.	38
Figura 11 - Ponto de Interpolação (G_C , G_{ct}), distância D e G_{CR}	40
Figura 12 - Representação em Bloco do Algoritmo de Análise com LPA para G_{CR}	42
Figura 13 - Exemplo de RAP para o Problema de Vibração em Tubulações.....	43
Figura 14 - NAP para determinação do Grau de Evidência de Risco Resultante.....	45
Figura 15 - Compressor Alternativo Utilizado na Unidade de Diesel da Refinaria.	48
Figura 16 - Tubulação de Sucção do Segundo Estágio.....	48
Figura 17 - Conexão da Tubulação onde Ocorreu Falha por VIF.	49
Figura 18 - Isométrico da Tubulação de Sucção do Segundo Estágio.....	50
Figura 19 - Modelo 3D para Linha de Sucção do Segundo Estágio no CAESAR II®.....	51
Figura 20 - Resposta em Modelo 3D para Segundo Modo de Vibração.....	52
Figura 21 - Aplicação de Deslocamento Harmônico no Modelo 3D.....	53
Figura 22 - Configuração da RAP para o Problema de Vibração em Tubulações.....	57
Figura 23 - Resultados da Análise Modal no CAESAR II®.	61
Figura 24 - Curva de Excitação do Vaso Amortecedor de Pulsação [Caso #1].	62
Figura 25 - Curva de Excitação do Vaso Amortecedor de Pulsação [Caso #2].	63
Figura 26 - Curva de Excitação do Vaso Amortecedor de Pulsação [Caso #3].	63
Figura 27 - Respostas de Vibração Obtidas para o Nó @100 da Tubulação [Caso #1]. .	64
Figura 28 - Respostas de Vibração Obtidas para o Nó @100 da Tubulação [Caso #2]. .	64
Figura 29 - Respostas de Vibração Obtidas para o Nó @100 da Tubulação [Caso #3]. .	65
Figura 30 - Resultados para Grau de Certeza Real resultante para o Caso #1.	66

Figura 31 - Respostas para Grau de Certeza Real resultante para o Caso #2.....	66
Figura 32 - Respostas para Grau de Certeza Real resultante para o Caso #3.....	67
Figura 33 - Grau de Evidência de Risco Resultante para o Caso #1.	68
Figura 34 - Grau de Tendência de Risco para o Caso #1.	68
Figura 35 - Predição de Falha em Dias Remanescentes para o Caso #1.....	69
Figura 36 - Predição para o Mês em que Ocorrerá a Falha para o Caso #1.....	69
Figura 37 - Grau de Evidência de Risco Resultante para o Caso #2.	70
Figura 38 - Grau de Tendência de Risco para o Caso #2.	70
Figura 39 - Predição de Falha em Dias Remanescentes para o Caso #2.....	71
Figura 40 - Predição para o Mês em que Ocorrerá a Falha para o Caso #2.....	71
Figura 41 - Grau de Evidência de Risco Resultante para o Caso #3.	72
Figura 42 - Grau de Tendência de Risco para o Caso #3.	72
Figura 43 - Predição de Falha em Dias Remanescentes para o Caso #3.....	73
Figura 44 - Predição para o Mês em que Ocorrerá a Falha para o Caso #3.....	73
Figura 45 - Curva de Excitação do Vaso Amortecedor de Pulsação [Caso 50%].	75
Figura 46 - Curva de Excitação do Vaso Amortecedor de Pulsação [Caso 25%].	75
Figura 47 - Predição para o Mês em que Ocorrerá a Falha para o Caso 50%.	76
Figura 48 - Predição para o Mês em que Ocorrerá a Falha para o Caso 25%.	76
Figura 49 - Interpretação dos Resultados para Predição da Falha por VIF.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mecanismos de Excitação Segundo Energy Institute.....	27
Tabela 2 - Valores de LOF para o Mecanismo: Excitação Mecânica.....	28
Tabela 3 - Exemplos para Determinação do LOF da Conexão de Derivação.....	29
Tabela 4 - Comparativo de Frequências Naturais (Numérica x Experimental).....	61
Tabela 5 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso #1].....	89
Tabela 6 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso #2].....	90
Tabela 7 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso #3].....	91
Tabela 8 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso 50%].	92
Tabela 9 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso 25%].	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EI	–	<i>Energy Institute</i>
EFRC	–	<i>European Forum Reciprocating Compressors</i>
FPSO	–	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
ISO	–	<i>International Organization for Standardization</i>
LOF	–	<i>Likelihood of Failure</i>
LP	–	Lógica Paraconsistente
LPA	–	Lógica Paraconsistente Anotada
LPA2v	–	Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de Dois Valores
NAP	–	Nó de Análise Paraconsistente
NPS	–	<i>Nominal Pipe Size</i>
QUPC	–	Quadrado Unitário no Plano Cartesiano
RAP	–	Rede de Análise Paraconsistente
RMS	–	<i>Root Mean Square</i>
SBC	–	<i>Small bore connection</i>
SBP	–	<i>Small bore piping</i>
SCH	–	<i>Schedule</i>
TPD	–	Tubulação de pequeno diâmetro
UEP	–	Unidade Estacionária de Produção
VIF	–	<i>Vibration-Induced Fatigue</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	–	Amplitude ou valor máximo do deslocamento
D	–	Distância do vértice ao estado lógico no reticulado da LPA2v
ε	–	Estado lógico no reticulado
F	–	Falso
f_n	–	Frequência natural
ϕ	–	Ângulo de fase
G_C	–	Grau de Certeza
G_{CR}	–	Grau de Certeza Real
G_{Cr}	–	Grau de Certeza resultante
G_{ct}	–	Grau de Contradição
k	–	Rigidez
LOF_{EXCIT}	–	LOF devido a excitação mecânica na linha principal
LOF_{GEO}	–	LOF devido a geometria da derivação TPD
LOF_{LOC}	–	LOF devido a localização da derivação TPD
LOF_{PUL}	–	LOF devido a pulsação hidráulica na linha principal
λ	–	Grau de Evidência desfavorável
m	–	Massa
μ	–	Grau de Evidência favorável
μ_{CR}	–	Grau de Evidência de Certeza Real Resultante
μ_{ctr}	–	Grau de Contradição resultante
μ_{ER}	–	Grau de Evidência Resultante Real
$\mu_{risco\ n-1}$	–	Grau de Evidência de risco anterior ao instante “ n ”
$\mu_{risco\ n}$	–	Grau de Evidência de risco no instante “ n ”
$\mu_{risco\ n+1}$	–	Grau de Evidência de risco posterior ao instante “ n ”
μ_{tend}	–	Grau de Tendência de Risco
$\mu_{ERRisco}$	–	Grau de Evidência de Risco Resultante
P	–	Proposição P
φ	–	Intervalo de certeza
φ_E	–	Intervalo de Evidência resultante
T	–	Inconsistente

$\perp$	–	Indeterminado
V	–	Verdadeiro
ω_n	–	Frequência natural angular
$x(t)$	–	Deslocamento
$\dot{x}(t)$	–	Velocidade
$\ddot{x}(t)$	–	Aceleração
X_{0-pico}	–	Amplitude de deslocamento (0-pico)
$\dot{X}_{0-pico}$	–	Amplitude de velocidade (0-pico)
$\ddot{X}_{0-pico}$	–	Amplitude de aceleração (0-pico)
X_{RMS}	–	Amplitude de deslocamento (RMS)
$\dot{X}_{RMS}$	–	Amplitude de velocidade (RMS)
$\ddot{X}_{RMS}$	–	Amplitude de aceleração (RMS)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Importância	16
1.2. Problemática	17
1.3. Justificativa	17
1.4. Objetivo	18
1.4.1. Objetivo Geral	18
1.4.2. Objetivo Específico	18
1.5. Fundamentação Teórica	18
1.5.1. Vibrações em Tubulações de Compressores Alternativos	19
1.5.2. Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de Dois Valores	34
2. MATERIAIS E MÉTODOS	47
2.1. Materiais	47
2.2. Métodos	47
2.2.1. Sistema de Previsão	55
2.2.2. Configuração da RAP Utilizada	56
2.2.3. Normalização dos Dados de Entrada	58
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
3.1. Resultados	61
3.2. Discussão	77
4. CONCLUSÃO	82
4.1. Trabalhos Futuros	82
5. REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE	88

1. INTRODUÇÃO

1.1. Importância

A ocorrência de vibrações excessivas em sistemas de tubulações industriais é um fenômeno bastante comum às unidades de processo. Em geral, estas vibrações podem ser causadas por fontes mecânicas (excitações provenientes de componentes mecânicos vibratórios, tais como: 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; LEONG, 2014, p. 350].

Conforme literatura, as falhas por fadiga em tubulações devido à presença de vibração excessiva é um problema conhecido (*e de longa data*), na indústria de óleo e gás. Segundo Wachel, Morton e Atkins (1990, p. 119), este tipo de falha é um dos principais responsáveis por paradas, incêndios e explosões em refinarias e plantas petroquímicas, já nas décadas de 60, 70 e 80, por exemplo. Estudos mais recentes, por sua vez, indicam que, no Mar do Norte, falhas por fadiga induzidas por vibrações em tubulações de processo respondem por 21% dos vazamentos de hidrocarbonetos em plataformas de produção de petróleo *offshore*. Já para o caso de instalações *onshore*, na Europa Ocidental, de 10 a 15% dos vazamentos de hidrocarbonetos ocorrem devido à presença de vibrações excessivas em tubulações [HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, 2008, p. 28; GHAZALI; HEE; LONG, 2014, p. 350; KEPRATE; RATNAYAKE, 2018, p. 1].

O mecanismo de dano conhecido como Fadiga Induzida por Vibração (*vibration-induced fatigue – VIF*), doravante VIF, decorre do surgimento de tensões alternadas em juntas soldadas localizadas nas conexões de derivações que, se acima de um nível crítico, se tornaram como regiões preferenciais para nucleação e/ou propagação de uma trinca de fadiga. A propagação da trinca, se não for impedida, levará a fratura da seção da junta soldada [ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 14].

Evidentemente, este tipo de falha (que leva a perda de contenção do fluido), é altamente indesejável em plataformas de petróleo, uma vez que a ignição de uma

atmosfera rica em hidrocarbonetos, 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. Com o intuito de mitigar este tipo de falha em tubulações de processo, foram elaboradas diretrizes técnicas para subsidiar a troca de informações entre projetistas, fabricantes, operadores e pesquisadores de equipamentos destinados a indústria de processos. Tais diretrizes estabelecem critérios de aceitação para os níveis de vibração presentes em equipamentos de processo e tubulações industriais, tanto para novos projetos, quanto em atividades de inspeção, manutenção ou reformas de instalações existentes [EUROPEAN FORUM RECIPROCATING COMPRESSORS, 2009; ENERGY INSTITUTE, 2008; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2018].

1.2. Problemática

Falhas por VIF são reconhecidas como um potencial modo de falha em sistemas de tubulações de processo. Este tipo de falha é altamente indesejável em refinarias e plataformas de petróleo, por exemplo, pois podem ocasionar sérios danos aos equipamentos, com perdas ambientais e econômicas significativas, além de representar uma séria ameaça à segurança de pessoas envolvidas na operação. O presente trabalho é uma aplicação da Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de Dois Valores (LPA2v), na predição deste tipo de falhas em tubulações de processo – especialmente àquelas acopladas à compressores alternativos. Como critério de aceitação para análise, foram adotados os valores definidos pela diretriz do Energy Institute para a probabilidade de falha por VIF (LOF – *Likelihood of Failure*) e para velocidade de vibração ($\dot{X}_{RMS}$), admissível em sistemas de tubulação.

1.3. Justificativa

A falha em tubulações por VIF é reconhecida como um potencial modo de falha em sistemas de tubulações de processo, presentes em estações de compressão de gasodutos, unidades de tratamento de gás, refinarias de petróleo e

unidades de produção de óleo e gás *offshore*. No entanto, não é prática comum para as equipes de inspeção, o monitoramento e controle de vibração em sistemas de tubulações. O desenvolvimento de uma Rede de Análise Paraconsistente capaz de prever a ocorrência deste evento, além de prevenir este tipo de falha, contribuirá para o aumento da segurança e da disponibilidade operacional destas instalações, especialmente, de Unidades de Produção Estacionária (UEP), localizados nos campos do pré-sal brasileiro.

1.4. Objetivo

1.4.1. Objetivo Geral

Predizer a ocorrência de níveis de vibração em sistemas de tubulação, capazes de provocar falhas por Fadiga Induzida por Vibração em unidades de processo.

1.4.2. Objetivo Específico

Utilizar algoritmos de LPA2v em Redes de Análise Paraconsistente para prever o risco de falha iminente em sistemas de tubulação acopladas a compressores alternativos de grande porte.

1.5. Fundamentação Teórica

Inicialmente, será apresentado uma breve introdução sobre vibrações em tubulações de processo, mecanicamente acopladas a compressores alternativos, bem como, a metodologia de avaliação utilizada pela diretriz do Energy Institute (EI Guidelines). Na sequência, será apresentado alguns fundamentos da Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de Dois Valores (LPA2v), do algoritmo NAP (Nó de Análise Paraconsistente), e de sua aplicação na forma de uma Rede de Análise Paraconsistente (RAP), destinada a predição de falhas em tubulações devido ao mecanismo de VIF. Para validação da RAP proposta, conforme

detalhado à frente, foi utilizado um estudo de caso para um sistema de tubulação que apresentou falha por fadiga devido à presença de vibração excessiva.

1.5.1. Vibrações em Tubulações de Compressores Alternativos

Compressores alternativos são equipamentos críticos comumente utilizados na extração de petróleo, produção de gás, refino de petróleo, indústrias químicas, de refrigeração e em estações de compressão de gasodutos [LIU; JIANG; WANG *et al*, 2020, p. 1]. Como principais características, além das elevadas pressões que estes equipamentos podem alcançar, possuem uma boa performance mecânica e uma tecnologia de fabricação bastante consolidada pelo seus fornecedores.

Tais equipamentos, no entanto, como todo equipamento de deslocamento positivo, são conhecidas fontes de excitação dinâmica (vibrações mecânicas), sendo responsáveis por problemas recorrentes de falhas em tubulações, gasodutos e sistemas auxiliares com os quais estão, mecanicamente, acoplados [GHAZALI; HEE; LEONG, 2014, p. 351; KACANI, 2017, p. 2; LIU; WANG; ZHAO *et al*, 2021, p. 479-480; MENDONÇA, 2020, p. 1].

Por esta razão, considerável esforço tem sido empreendido para aumento da segurança de processo nestas instalações, através do uso de simulação computacional e inteligência artificial na análise de dados de vibração, com o intuito de se avaliar a integridade estrutural e a predição de falhas em equipamentos [KEPRATE; RATNAYAKE, 2016, p. 71; LU; HUANG; WU, 2016, p. 1-2; TIAN; YUAN; YANG *et al*, 2016, p. 328-329; ZAJAM; JOSHI; BHATTACHARYA, 2019, p. 712-713; LIU; WANG; ZHAO *et al*, 2021, p. 479].

De forma geral, a vibração mecânica pode ser definida como um movimento oscilatório em torno de uma posição de equilíbrio. A Figura 1 ilustra um exemplo simples com um sistema massa-mola. As propriedades vibratórias em sistemas de engenharia são, muitas vezes, fatores limitantes em seu desempenho e, quando prejudicial, a vibração deve ser analisada e controlada [INMAN, 2018, p. 2].

Quando a massa (m) é puxada para baixo e depois liberada, a mola se estende, depois se contrai e continua a oscilar por um período de tempo. A frequência de oscilação resultante é conhecida como a *frequência natural* do

sistema e é controlada pela massa (m) e rigidez (k) do sistema, conforme Equação (1):

$$\text{Frequência Natural: } f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\text{rigidez da mola } (k)}{\text{massa } (m)}} \quad (1)$$

E, para um sistema com um grau de liberdade, o movimento da massa (m) da Figura 1, que é periódico, pode ser descrito pela Equação 2:

$$x(t) = A \sin(\omega_n + \phi) \quad (2)$$

A Equação (2) é a função seno em sua forma mais geral e descreve o movimento de oscilação, onde: a constante A é a *amplitude*, ou valor máximo de deslocamento; ω_n , denominado de *frequência natural angular*, determina o intervalo no tempo durante o qual a função se repete; e ϕ , chamado de *ângulo de fase*, determina o valor inicial da função seno [INMAN, 2018, p. 8].

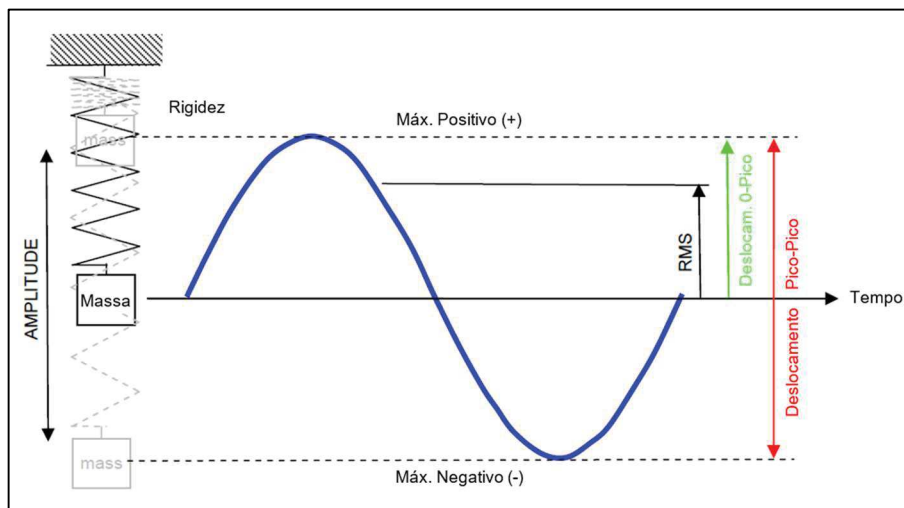


Figura 1 - Ilustração de Vibração em Sistema Massa-Mola Simples.
Fonte: Adaptado da Figura 2-1 do EI [ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 5].

A diferenciação sucessiva da Equação (2), fornece a equação para velocidade, $\dot{x}(t)$, que é dada pela Equação (3):

$$\dot{x}(t) = \omega_n A \cos(\omega_n + \phi) \quad (3)$$

E a equação para aceleração, $\ddot{x}(t)$, que é dada pela Equação (4):

$$\ddot{x}(t) = -\omega_n^2 A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (4)$$

Por sua vez, a Equação (1) pode ser rescrita como:

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m}, \quad \text{ou} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

Apesar do sistema massa-mola representar um modelo de fácil compreensão para descrever o movimento de uma partícula, através de suas quantidades cinemáticas fundamentais (*vetores deslocamento, velocidade e aceleração*), tubulações são sistemas contínuos (e mais complexos), portanto, diferentemente de um sistema massa-mola, apresentarão infinitas frequências e modos naturais de vibração. No entanto, antes de se avançar no problema da vibração em tubulações e de suas especificidades, será necessário apresentar algumas definições importantes para um sistema de tubulação.

Em uma estação de compressão de um gasoduto, em uma unidade de tratamento de gás, em uma refinaria de petróleo ou em uma plataforma *offshore*, o sistema de tubulação – neste último exemplo, também conhecido como tubulações de *topside* (para diferenciar das tubulações submarinas), é composto pelas tubulações das linhas principais (*main lines*), de maior diâmetro, e por derivações construídas em linhas de menor ou igual diâmetro. No caso de tubulações de pequeno diâmetro (TPD), ou *small bore piping* (SBP), as mesmas são utilizadas como derivações para ramais, tomadas de instrumentação, drenos, linhas de ventilação (*vents*), derivações para válvulas de segurança de pressão (PSV's), dentre outros. Uma TPD (tubulação de pequeno diâmetro), é definida como a tubulação que está conectada a uma linha principal através de uma conexão de derivação, ou SBC (*small bore connection*), e que se estende até que o efeito da vibração da tubulação da linha principal seja insignificante. Seu diâmetro nominal não excede NPS 2 polegadas. A interligação da TPD à linha principal, por meio da conexão de derivação (SBC), é feita através de juntas soldadas [HARPER, 2014, p. 2; KEPRATE; RATNAYAKE, 2016, p. 73]. Ver ilustração na Figura 2.

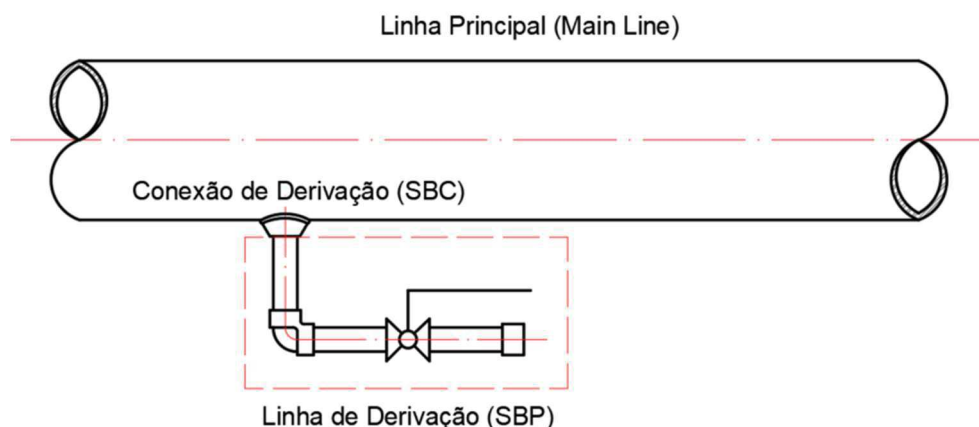


Figura 2 - Desenho Esquemático de Sistema de Tubulação. Na figura acima, é possível observar uma linha principal e uma linha de derivação (linha de dreno), “conectadas”.
Fonte: Adaptado de HARPER, 2014, p. 2.

Via de regra, o projeto de tubulações é feito com base em análise estática. Assim, problemas de fadiga por vibração são tratados de forma isolada, particularizadas para cada caso. Normas de projeto para tubulações de processo, como a ASME B31, por exemplo, são omissas quanto a detalhes relacionados a vibração em sistema de tubulação. Apenas mencionam preocupações quanto aos efeitos de vibração oriundas de impacto, pulsação de pressão, vórtices de fluxo turbulento, ressonância em compressores, vórtices externos (por exemplo, carga de vento) e vibração acústica (conforme item 301.5.4 da ASME B31.3: 2020). E, também, alertam para o risco de falha em conexões para derivações de pequeno diâmetro, recomendando o uso do Energy Institute (no Apêndice F, item F301.10.3) [THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2020, p. 12, 419].

Conforme Swindell (2007, p. 2543), para ocorrer a falha por VIF em um sistema de tubulação, será necessário estar presente: (a) alguma forma ou fonte de excitação, (b) capaz de produzir vibração na linha principal – como resposta à excitação, e (c) propagação da vibração na linha principal à tubulação de pequeno diâmetro (geralmente, em um nível amplificado), promovendo dano na conexão de derivação (SBC). A representação desta “cadeia”, necessária à falha por VIF, encontra-se ilustrada na Figura 3. Também são listados fatores que influenciam esse mecanismo de dano. Ainda de acordo com o autor, raramente a falha por VIF ocorrerá em uma junta soldada que não seja a junta que une a conexão à linha TPD.

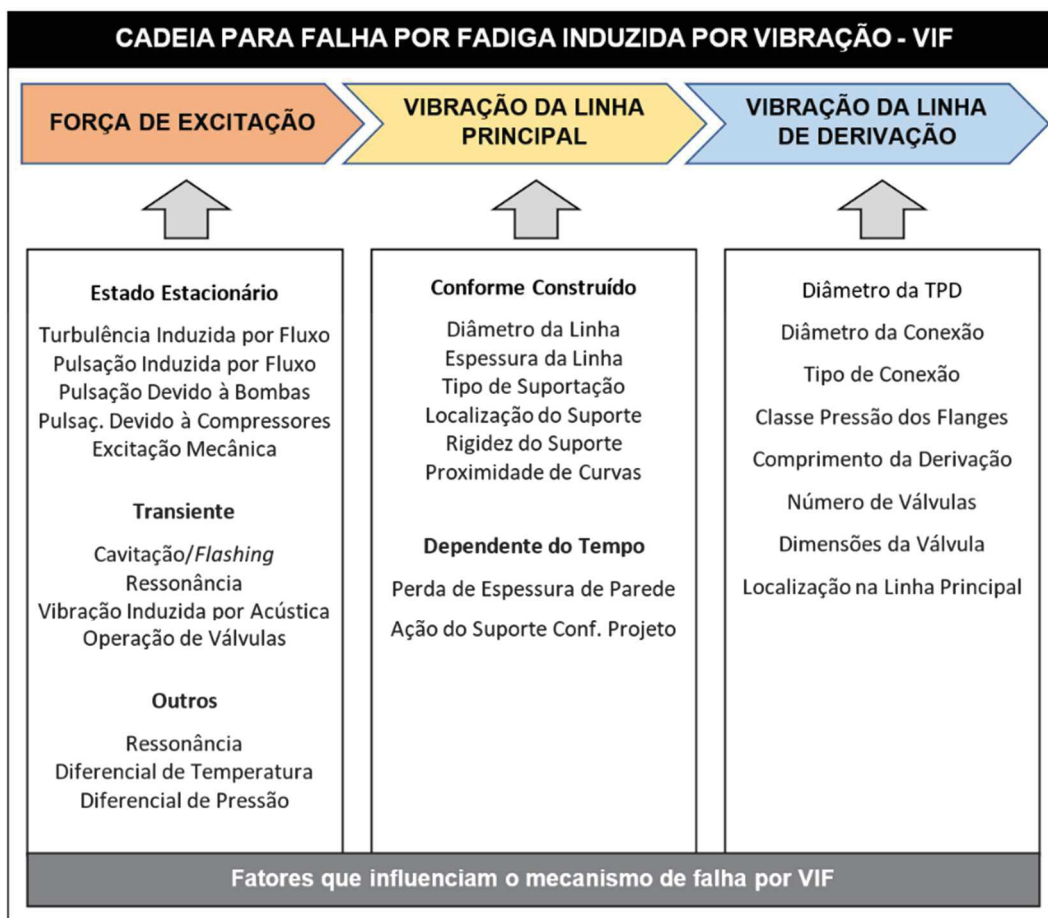


Figura 3 - Cadeia para Falha por Fadiga Induzida por Vibração.
 Fonte: Adaptado de SWINDELL, 2007, p. 2544 e de KEPRATE;
 RATNAYAKE, 2016, p. 73.

De acordo com Keprate e Ratnayake (2016, p. 73 e 74), em um sistema de tubulação industrial, tensões cíclicas são originadas na conexão de derivação devido a transmissão da vibração da linha principal para a linha de pequeno diâmetro (TPD ou SBP). Como a linha de pequeno diâmetro tem uma rigidez menor que a linha principal, o nível de vibração na TPD tende a ser maior que na linha principal. Assim, a depender do nível de tensões atuantes na junta soldada da conexão com a TPD, trincas de fadiga se propagarão, preferencialmente, nesta junta soldada. E do ponto de vista da integridade mecânica é imperativo entender a cadeia das etapas que conduzem à falha por VIF nas conexões de derivação, a fim de poder mitigá-la.

Conforme ilustrado na Figura 3, as forças de excitação que causam vibração na tubulação da linha principal podem surgir em regime de *estado estacionário* ou *transiente*. A vibração atuante em estado estacionário ocorre em condições normais

de operação e se origina devido a efeitos como turbulência induzida pelo fluxo, pulsações induzidas pelo fluxo, pulsações devido às bombas e compressores, etc. [ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 7-10]. Já as vibrações decorrentes de estados transientes, por outro lado, surgem durante eventos como mudanças nas condições de operação, entrada em operação de unidades adicionais, partida e desligamento rotineiros, *shutdown* (desligamento de emergência), fechamento repentino de válvulas, etc. [HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, 2002, p. 1].

A maioria dos mecanismos de excitação descritos na Figura 3 são dependentes do processo e de mudanças operacionais. Por exemplo, se a velocidade do fluxo na linha principal aumenta em 20%, então, o nível de energia turbulenta presente, aumentará em uma quantidade que varia entre 40% e 50% [SWINDELL, 2007, p. 2544]. Além disso, características relacionadas à geometria da tubulação (tais como diâmetro, espessura de parede, comprimento, etc.), também influenciam na extensão do dano por fadiga que ocorrerá para um determinado nível de excitação [ENERGY INSTITUTE, 2007, p. 70-84].

Dilatações na linha principal (devido a um diferencial de temperatura), além da presença de vibrações excessivas, podem desenvolver o surgimento de trincas, tanto na tubulação da linha principal, quanto na tubulação de pequeno diâmetro (fadiga térmica). No entanto, conforme destacam Harper e Schubring (2014, p. 4), a maioria das falhas por fadiga ocorrem nas conexões das linhas de pequeno diâmetro (SBC), devido a VIF. As estatísticas ratificam tal entendimento pois, de acordo com Health and Safety Executive (2008, p. 28), 70% das falhas por VIF em tubulações em uma plataforma *offshore*, por exemplo, ocorrem nas juntas entre as conexões de derivações e as tubulações de pequeno diâmetro.

Swindell (2007, p. 2543-2544) e Keprate e Ratnayake (2016, p. 74), também concordam que a razão para a maior taxa de falha nestas conexões se deve ao fato de que as vibrações presentes na tubulação principal (devido às forças de excitação), são amplificadas nas tubulações de pequeno diâmetro, aumentando o nível de tensões cíclicas nas juntas soldadas das conexões de derivação (típicos concentradores de tensões). Portanto, o mapeamento e monitoramento destas conexões (SBC), são de extrema importância em tubulações consideradas críticas e sujeitas à vibração, para garantia da integridade mecânica [HARPER, 2014, p. 1].

A fim de compreender melhor os mecanismos de excitação capazes de levar a uma falha por fadiga em tubulações, Keprate e Ratnayake (2016, p. 74), apresentam uma *taxonomia* para falha por fadiga em tubulações de processo, destacando-se a falha por VIF, conforme ilustrado na Figura 4.

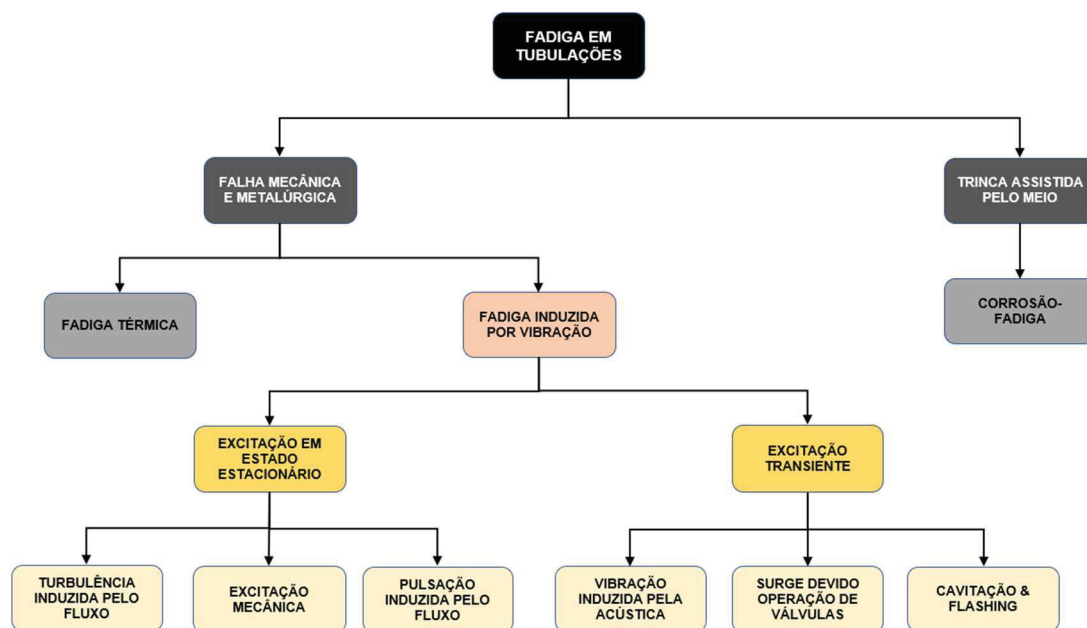


Figura 4 - Taxonomia da Fadiga em Tubulações de Processo.
Fonte: Adaptado de KEPRATE e RATNAYAKE, 2016, p. 74.

Dentre os tipos de fadiga mencionados na Figura 4 para sistemas de tubulação, a Fadiga Induzida por Vibração (VIF) é o tipo de falha mais importante e comum na região do Mar do Norte. Análise das causas imediatas de falhas responsáveis por vazamento de hidrocarbonetos apontam que: em primeiro lugar, a degradação das propriedades do material (*por processos corrosivos*), responde por 28% do total de falhas observadas. Já as falhas devido a montagem incorreta e problemas de fadiga/vibração, ambos com 21%, ficaram empatados como segundo maior contribuinte. Na sequência, corrosão/erosão corresponde a 13% do total de falhas [HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, 2008, p. 30]. Isso implica, por exemplo, que a propagação de trincas devido a VIF é uma causa mais relevante para o evento de vazamento de hidrocarbonetos em tubulações do que o mecanismo de corrosão-erosão.

Embora seja possível mitigar tanto a probabilidade de falha por fadiga quanto o vazamento de hidrocarboneto em conexões de TPD, seguindo-se boas práticas

de engenharia para elaboração de projetos eficientes, inevitavelmente, tubulações de processo *topside* irão se deparar com problemas de vibração durante sua vida útil. Assim, além de um projeto que contemple vibrações, atividades de inspeção, manutenção e reparo regular em plantas de processo são indispensáveis para garantia da integridade mecânica de tubulações durante sua vida útil de projeto.

Considere, por exemplo, a queda de *performance* no sistema de controle de capacidade em compressores alternativos – algo comum em operações de longo prazo, conforme Liu, Jiang, Wang *et al* (2020, p. 2). Operar com o equipamento nesta condição, pode aumentar o nível de vibração e, conseqüentemente, as forças de excitação impostas aos sistemas de tubulações acoplados a tais equipamentos.

De acordo com Miljković (2015, p. 15, 21-22), a “Curva da Banheira” (Estágio III), representa de forma satisfatória o incremento crescente do nível de vibração e da taxa de falhas em função do tempo para compressores alternativos. Assim, tal comportamento pode ser utilizado como modo de falha para sistemas de compressão dotados com este tipo de equipamento [XENOS, 2014, p.70-75].

Uma vez identificado a existência de problemas de vibração em tubulações, a metodologia do Energy Institute, usualmente empregada para a análise do risco de falha por VIF, propõem uma avaliação em três etapas distintas [SWINDELL, 2007, p. 2545; ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 17-19; KEPRATE; RATNAYAKE, 2016, p. 72].

Segue uma descrição sucinta de cada um dos três estágios (ou etapas), utilizados na metodologia proposta pela Diretriz do Energy Institute, para avaliação e prevenção do risco de falha em tubulações industriais por VIF:

Estágio 1: Na primeira etapa, é realizada uma avaliação qualitativa do sistema de tubulação, com o objetivo de se identificar potenciais mecanismo de excitação existentes. A avaliação considera fatores de excitação (vibração) e fatores de condições operacionais, podendo ser aplicada, tanto em novos projetos, como em plantas existentes. O resultado é uma classificação de probabilidade de falha com base em pontuações (alta, média e baixa), que é utilizada para fornecer uma avaliação qualitativa geral do risco no sistema de tubulação. Esta etapa encontra-se detalhada na seção referente ao Módulo Técnico TM-01 da diretriz [ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 33-46];

Estágio 2: Uma avaliação quantitativa é realizada na linha principal do sistema, para cada um dos mecanismos de excitação identificados a partir da avaliação qualitativa do Estágio 1 (tais como: excitação mecânica, pulsações devido a equipamentos de deslocamento positivos, equipamentos rotativos ou vibração induzida por fluxo). Isso resultará em uma pontuação (obtida de tabelas ou de equações), correspondente a probabilidade de falha “LOF” (do inglês: *Likelihood of Failure*), para cada mecanismo de excitação identificado na tubulação. Ver Tabela 1 e Tabela 2, para ilustração dos mecanismos de excitação e para um exemplo de determinação de LOF, respectivamente. Esta etapa encontra-se detalhada na seção referente ao Módulo Técnico TM-02 da diretriz [ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 47-69];

Estágio 3: Dependendo das pontuações do LOF para a linha principal ($\text{LOF} \geq 0,3$), pode ser necessária uma avaliação quantitativa do LOF da conexão de derivação para linhas de pequeno diâmetro (dreno, *vent*, tomada de instrumentação). Isso envolve avaliar cada conexão de derivação na linha principal, individualmente, com base em informações geométricas e de localização da derivação. Ver exemplos na Tabela 3. Esta etapa encontra-se detalhada na seção referente ao Módulo Técnico TM-03 da diretriz [ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 70-84].

Tabela 1 - Mecanismos de Excitação Segundo Energy Institute.

Mecanismo de Excitação (Linha Principal)	Seção
Turbulência Induzida por Fluxo	T2.2
Excitação Mecânica	T2.3
Pulsação: Bombas e Compressores Alternativos (Deslocamento Positivo)	T2.4
Pulsação: Máquinas Rotativas na condição "stall"	T2.5
Pulsação: Excitação Induzida por Fluxo	T2.6
Excitação Acústica por Alta Frequência	T2.7
Golpe de Aríate Devido a Operação de Válvula	T2.8
Cavitação e <i>Flashing</i>	T2.9

Fonte: adaptado de ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 47.

Tabela 2 - Valores de LOF para o Mecanismo: Excitação Mecânica.

Tubulação Conectada ou Adjacente à:	LOF (Likelihood of Failure) para Excitação Mecânica
Bomba ou Compressor Alternativo (Deslocamento Positivo)	0,9
Motor à Diesel / Motor à Gás	0,8
Bomba ou Compressor de Parafusos	0,6
Bomba Centrífuga	0,4
Motor Elétrico / Tensão Alternada (15 kW ou superior)	0,4
Motor Elétrico / Tensão Alternada (menor que 15 kW)	0,2
Compressor Centrífugo	0,2
Turbina à Gás	0,2
Ventiladores	0,2
Outras Tubulações com um LOF $\geq 0,5$	Mesmo LOF que a Linha Adjacente

Fonte: Adaptado de ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 54.

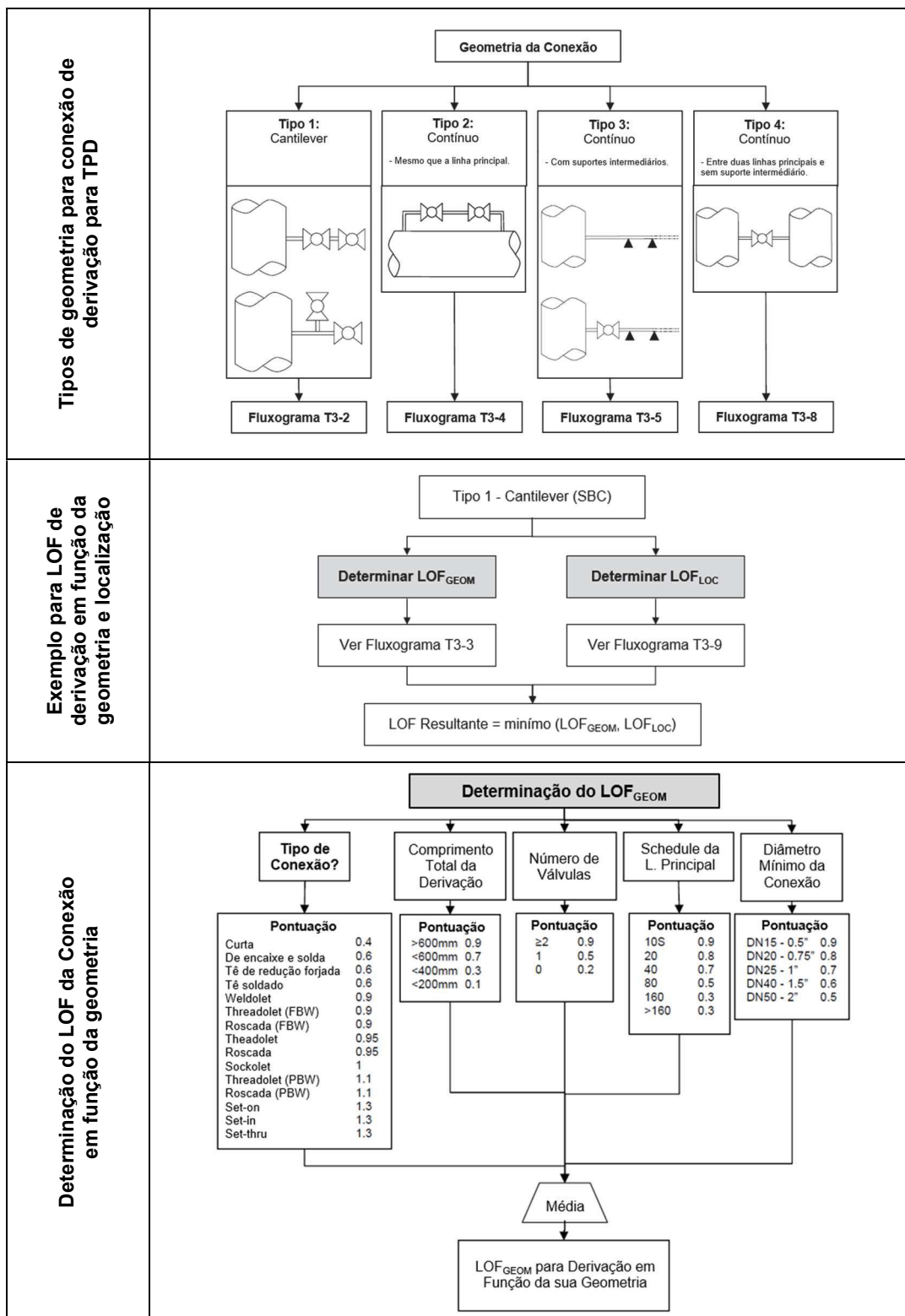
Ainda, de acordo com Energy Institute (2008, p. 16), o parâmetro denominado de LOF (*Likelihood of Failure*), traduzido aqui como probabilidade de falha, é o utilizado nos Estágios 2 e 3 para o processo de avaliação acima, não é exatamente uma probabilidade absoluta nem uma medida absoluta de falha. A ideia é de quantificar uma tendência ou predisposição à falha por VIF. Os cálculos são baseados em modelos simplificados para garantir a facilidade de aplicação e são necessariamente conservadores.

Para um sistema de tubulação, acoplado mecanicamente a um compressor alternativo, os principais mecanismos de excitação atuantes seriam: [a] excitação mecânica, de natureza inercial, devido a característica do equipamento, e [b] excitação induzida por pulsação de fluxo, causada por esforços devido à pressão flutuante na superfície das paredes da tubulação [MERIKOSKI, 2017, p. 17 e 19].

Além dos estágios descritos acima (para determinação do LOF), as diretrizes do Energy Institute consideram outras técnicas possíveis de serem aplicadas durante uma avaliação para se identificar o risco de falha por VIF. Por exemplo, pode-se citar a inspeção visual do sistema de tubulações, a medição do nível de

vibração de campo, além do uso de técnicas de medição não convencionais e preditivas [ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 89-113, 114-118, 119-125].

Tabela 3 - Exemplos para Determinação do LOF da Conexão de Derivação.



Fonte: Adaptado do ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 70-71.

Keprate e Ratnayake (2015 e 2016), entretanto, consideram que o método de avaliação proposto pelo Energy Institute apresenta algumas dificuldades. Realizar, por exemplo, uma avaliação qualitativa de um grande número de sistemas ou unidades (ou seja, o Estágio 1 da diretriz), é algo trabalhoso e demorado [KEPRATE; RATNAYAKE, 2015, p. 737; KEPRATE; RATNAYAKE, 2016, p. 72].

Um outro argumento é que, no caso de uma análise do nível de vibração espectral em tubulações, as linhas que delimitam as regiões nos gráficos utilizados como critérios de aceitação (ou seja, que determinam o potencial de dano por fadiga, associada ao nível de vibração na tubulação), são elaborados a partir de conjuntos de valores clássicos (lógica booleana), conforme pode ser observado através da Figura 5.

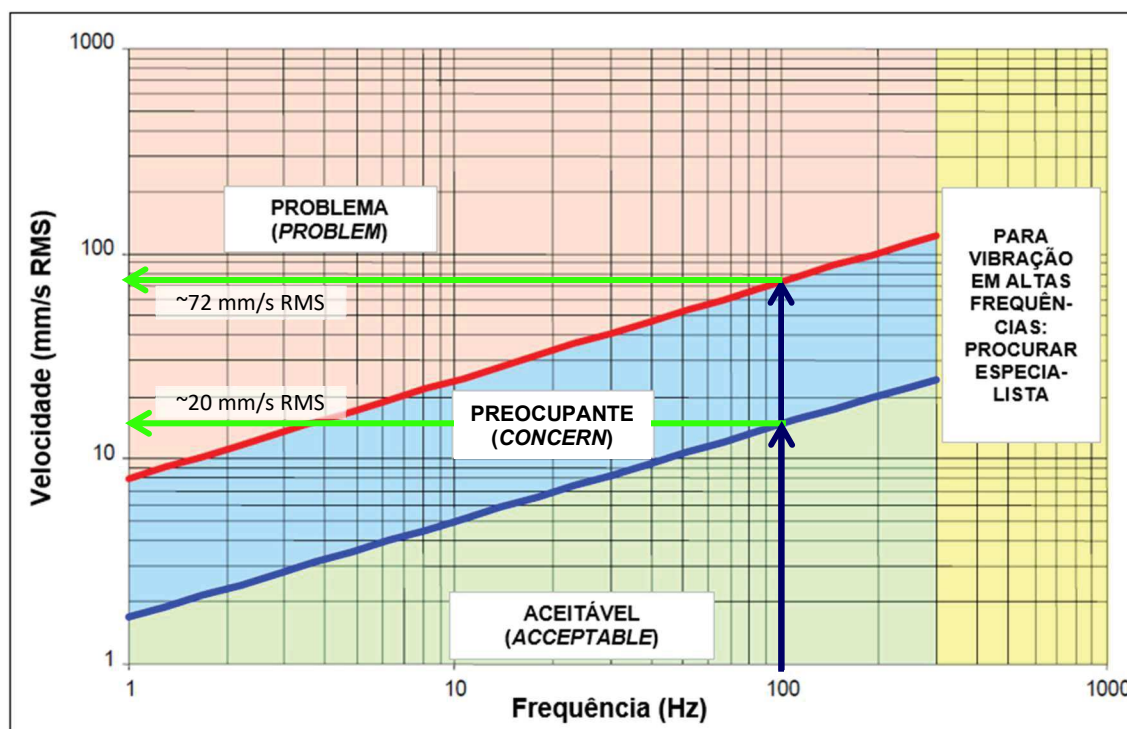


Figura 5 - Critérios de Aceitação de Vibração em Sistemas de Tubulação.
Fonte: Adaptado da Figura T7-2 do EI [ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 117].

No gráfico da Figura 5 está indicado que, para uma frequência de 100 Hz (indicada pela *linha vertical na cor azul escuro*), a velocidade quadrática média correspondente (do inglês, *Root Mean Square – RMS*), a partir da qual o nível de vibração deixaria de ser aceitável, estaria em torno de 20 mm/s (intercepção da *linha inclinada na cor azul*). Acima deste valor, o nível de vibração seria considerado

preocupante (devendo ser monitorada), até que a velocidade quadrática média atingisse um valor em torno 72 mm/s (indicado pela *linha inclinada na cor vermelha*). Neste caso, para uma frequência de 100 Hz, qualquer velocidade entre 20 e 72 mm/s seriam igualmente preocupantes. A partir de 72 mm/s o nível de vibração seria considerado *problemático*, não devendo ser permitido.

No entanto, esta distinção não parece ser praticável, pois no mundo real, o dano por fadiga acumulado para um sistema de tubulação operando na região *preocupante* do gráfico da Figura 5 será, consideravelmente, diferente para uma vibração com velocidade igual à 20 mm/s e à 72 mm/s. Assim, o critério de avaliação baseado na metodologia proposta pelo EI, para a região citada do gráfico, parece não ser o mais adequado para aplicações no mundo real [KEPRATE e RATNAYAKE, 2018, p. 02].

As curvas que delimitam o limite inferior para as áreas “Preocupante” (*Concern*) e “Problemática” (*Problem*), podem ser calculadas pelas Equações (6) e (7):

$$\text{Vibração Preocupante} \geq 10^{\frac{(\log(f)+0,48017)}{2,127612}} \quad (6)$$

$$\text{Vibração Problemática} \geq 10^{\frac{(\log(f)+1,871083)}{2,084547}} \quad (7)$$

Sendo f a frequência de pico dominante.

Além da metodologia do EI Guidelines, existem outras diretrizes para se avaliar o nível ou velocidade de vibração em uma tubulação, conforme já mencionado anteriormente. Por exemplo, ainda para tubulações de processo interligadas a compressores alternativos, pode-se utilizar as diretrizes propostas na Norma ISO 20816-8:2018. A título de ilustração, na Figura 6, tem-se a curva com os critérios de aceitação estabelecidos pela ISO.

De acordo com a diretriz da ISO: as Zonas A e B são *aceitáveis*, a Zona C seria *marginal* (preocupante), e a Zona D, por sua vez, seria *inaceitável* [INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2018, p. 11].

O modelo de análise proposto no presente trabalho, considerou o uso de duas fontes de informações: a probabilidade de falha (LOF) e a máxima velocidade

de vibração ($\dot{X}_{RMS}$) no espectro de frequência – ambos, conforme metodologia do Energy Institute (2008).

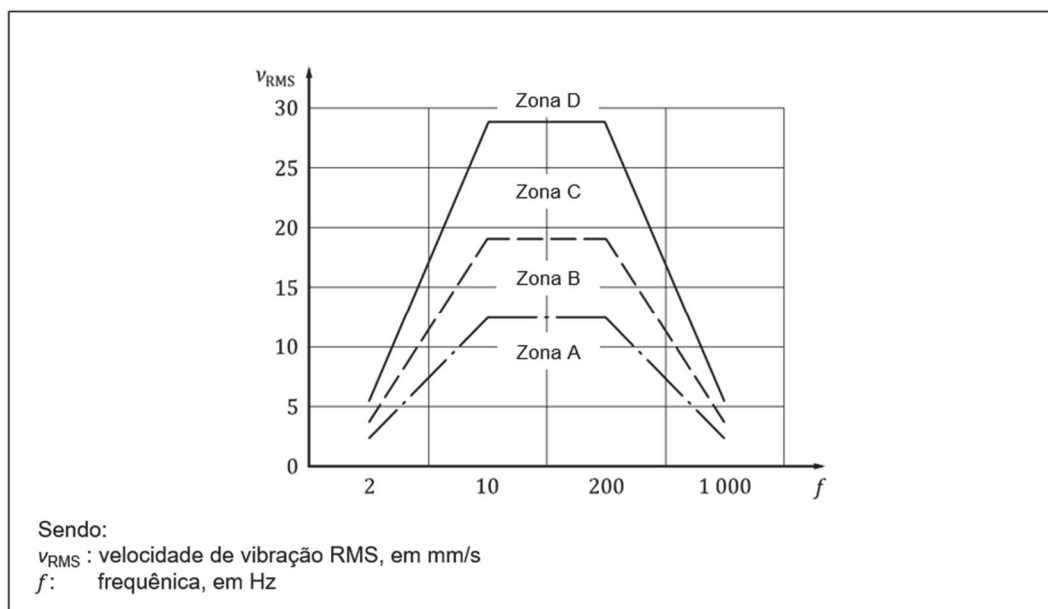


Figura 6 - Curvas Limites para Velocidade de Vibração de acordo com a ISO. Valores para velocidade de vibração global na tubulação principal e em vasos amortecedores de pulsação para um compressor alternativo com cilindros dispostos horizontalmente.
 Fonte: Adaptado da Figura B.5 da ISO [INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2018, p. 20].

Para se introduzir critérios de aceitação para velocidades de vibração em análises de risco de falha de tubulações por VIF, (conforme os gráficos representados na Figura 5 ou na Figura 6), será necessário determinar os valores para máximas velocidades de vibração, bem como, suas respectivas direções de atuação. Isto pode ser obtido com o apoio das equipes de inspeção de equipamentos, responsáveis pela medição de vibração através de sensores específicos (acelerômetros). Estas medições são feitas em diversos pontos e nas três direções possíveis (vertical, Norte-Sul e Leste-Oeste), ao longo das tubulações que se desejam avaliar – com a unidade em operação.

E, conforme Papadopoulos e Aboulella (2018, p. 1-3), para vibração harmônica em estado estacionário, os valores de pico (0-pico), para as amplitudes do *deslocamento* (X_{0-pic}), da *velocidade* ($\dot{X}_{0-pic}$) e da *aceleração* ($\ddot{X}_{0-pic}$), considerando uma dada frequência natural f_n , podem ser relacionados através das seguintes equações:

$$X_{0-pic} = \frac{\dot{X}_{0-pic}}{2\pi f_n} \quad (8)$$

$$\dot{X}_{0-pic} = 2\pi f_n X_{0-pic} \quad (9)$$

$$\ddot{X}_{0-pico} = (2\pi f_n)^2 X_{0-pic} \quad (10)$$

É possível observar, pelas Equações (8), (9) e (10), como cada um destes parâmetros depende da frequência. As curvas de comparação de amplitude do deslocamento, velocidade e aceleração encontram-se plotadas na Figura 7.

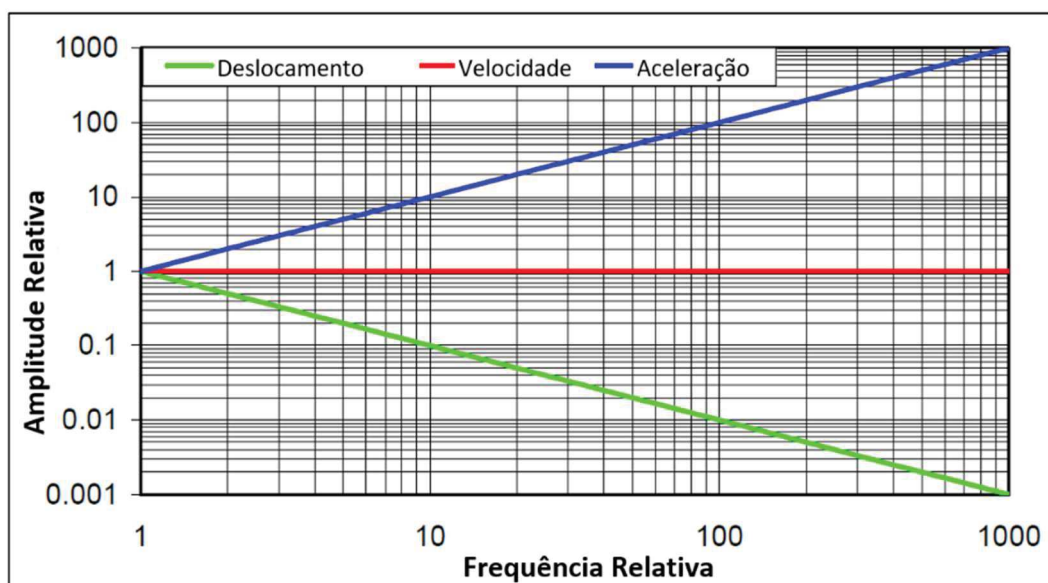


Figura 7 - Comparação da Amplitude do Deslocamento, Velocidade e Aceleração.
Fonte: Adaptado Figura 2-2 do EI [ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 6].

De acordo com a Figura 7, o deslocamento é dependente da frequência de forma a resultar grandes deslocamentos para baixas frequências e pequenos deslocamentos para altas frequências, para uma mesma quantidade de energia. Por outro lado, a aceleração é ponderada de modo que a amplitude mais alta ocorra na frequência mais alta. Já a velocidade fornece uma ponderação mais uniforme na faixa de frequência de interesse (vibrações em tubulações, normalmente, ocorrem em uma faixa de frequência entre de 5 a 200 Hz), e está mais diretamente relacionada às tensões dinâmicas resultantes. Portanto, a velocidade é mais comumente usada como medição de vibração e, por isso, a observação visual da

vibração da tubulação (deslocamento), não é um método confiável para avaliar a gravidade do problema [ENERGY INSTITUTE, 2008, p. 6; PAPADOPOULOS; ABOULELLA, 2018, p. 3].

Como as diretrizes de tubulação estabelecem limites para as velocidades de vibração, as Equações (8), (9) e (10) são úteis durante uma análise de risco de falha por VIF, sempre que for necessário relacionar deslocamento ou aceleração com estes limites.

1.5.2. Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de Dois Valores

A Lógica Paraconsistente (LP) 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 LP 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. Dentre a família de lógicas consideradas paraconsistentes destaca-se a Lógica Paraconsistente Anotada (LPA) que, através de interpretações em seu reticulado associado, permite-se deduzir equações formando algoritmos eficientes e 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].

Conforme Da Silva Filho, Abe e Torres (2008, p. 7-8), a LPA inclui procedimentos para acolher os conceitos de incerteza, inconsistência e paracompleteza em sua estrutura linguística e permite raciocinar (mecanicamente) a partir deles.

A LPA é representada na forma de um reticulado de quatro vértices – chamado de reticulado finito de *Hasse* ou reticulado de valores-verdades. Em cada vértice, tem-se os estados lógicos extremos $[V, T, F, \perp]$, referentes à proposição P que será analisada.

Na Figura 8, pode-se observar o reticulado de *Hasse* com a indicação dos quatro estados lógicos extremos nos seus vértices – *inconsistente*, *falso*, *verdadeiro* e *paracompleto* (ou *indeterminado*).

Também é possível observar na Figura 8, que as proposições são acompanhadas de anotações (pares ordenados), em cada um dos quatro estados lógicos extremos representados nos vértices do reticulado. Este tipo de representação, com anotações ou evidências, que expressam o conhecimento sobre uma proposição P , utilizando um reticulado formado por pares ordenados (μ, λ) , constitui uma aplicação da LPA e é conhecida como Lógica Paraconsistente Anotada com Anotações de Dois Valores (LPA2v). O primeiro elemento do par ordenado (μ) representa o grau em que as evidências favoráveis sustentam a proposição P , e o segundo elemento (λ) representa o grau em que as evidências desfavoráveis ou contrárias negam ou rejeitam a proposição P . Assim, o Grau de Evidência favorável em P é μ , ao passo que o Grau de Evidência desfavorável ou contrário é λ [DA SILVA FILHO, ABE, TORRES, 2008, p. 13-15].

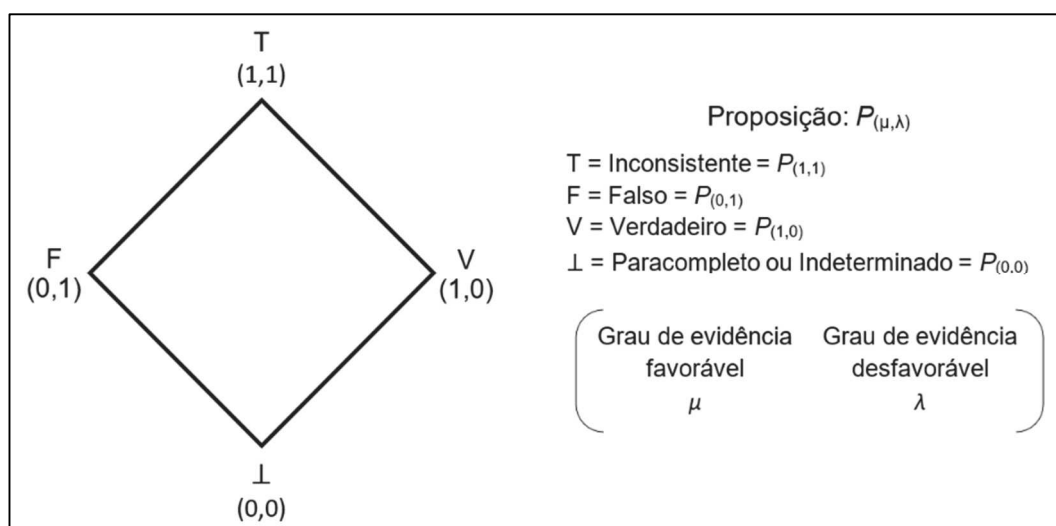


Figura 8 - Reticulado Finito de Hasse com Anotações da LPA2v. Observe os quatro estados lógicos extremos para a proposição P , indicados nos vértices do reticulado e suas anotações. Fonte: Adaptado das Figuras 1.3 e 1.4 [DA SILVA FILHO, ABE, TORRES, 2008, p. 13 e 15].

No tocante as aplicações, a LPA tem sido empregada nos mais diversos campos do conhecimento humano, sempre com o objetivo de permitir um tratamento adequado de dados (sinais), mesmo na presença de contradições e sem, no entanto, trivializar o problema (dissolver as conclusões). Atualmente, a LPA ocupa posição diferenciada em diversos tipos de aplicação, quando comparadas a outras lógicas *não clássicas* [ABE, NAKAMATSU, DA SILVA FILHO, 2019, p. 1175-1181].

É importante ressaltar que no mundo real, a contradição é uma incoerência e, em um sistema clássico de análise, é geradora de incerteza que resulta sempre em uma impugnação. Por outro lado, só existe contradição quando existem duas ou mais fontes de informação. Logo, se em um sistema real houver somente uma única fonte de informação não existe contradição. Assim a contradição se torna um problema para quem irá tomar alguma decisão com base nos dados de entrada [DA SILVA FILHO, ABE, TORRES, 2008, p. 86].

Já no caso de um sistema de Análise Paraconsistente, ainda conforme Da Silva Filho, Abe e Torres (2008, p. 20-68), as atribuições dos valores dos Graus de Evidência favorável e desfavorável (respectivamente, μ e λ), têm como objetivo oferecer uma resposta ao problema de sinais contraditórios. Isto é feito coletando-se evidências e, por meio de análises, o sistema procurará modificar seu comportamento para que a intensidade das “contradições” diminua. Como os valores dos Graus de Evidência variam entre 0 e 1, pode-se obter a qualquer instante como resposta, os Graus de Contradição (equação 11) e de Certeza (equação 12), respectivamente, G_C e G_{ct} . É através da amplitude destes valores (tidos como saídas ou resultados), que serão determinados qual seria a “*certeza*” e a “*contradição*” associadas a proposição que está sendo avaliada.

Para as deduções das equações da LPA2v, inicialmente é utilizado um Quadrado Unitário no Plano Cartesiano (QUPC), onde ficam dispostos os graus de evidência favorável μ (no eixo x) e desfavorável λ (no eixo y), formando uma anotação de dois valores (μ, λ) . Através de transformações algébricas um outro sistema de coordenadas (diferente daquele que foi apresentado no QUPC e similar ao sistema de coordenadas do Reticulado na Figura 8), permite a dedução de equações para os Graus de Certeza (G_C) no eixo horizontal e de Contradição (G_{ct}), no eixo vertical conforme pode ser visto na Figura 9.

Dessa forma, as Equações (11) e (12) permitem determinar os Graus de Certeza (G_C) e de Contradição (G_{ct}), respectivamente, a partir dos Graus de Evidência favorável (μ) e desfavorável (λ):

$$G_C = (\mu - \lambda) \quad (11)$$

$$G_{ct} = \mu + \lambda - 1 \quad (12)$$

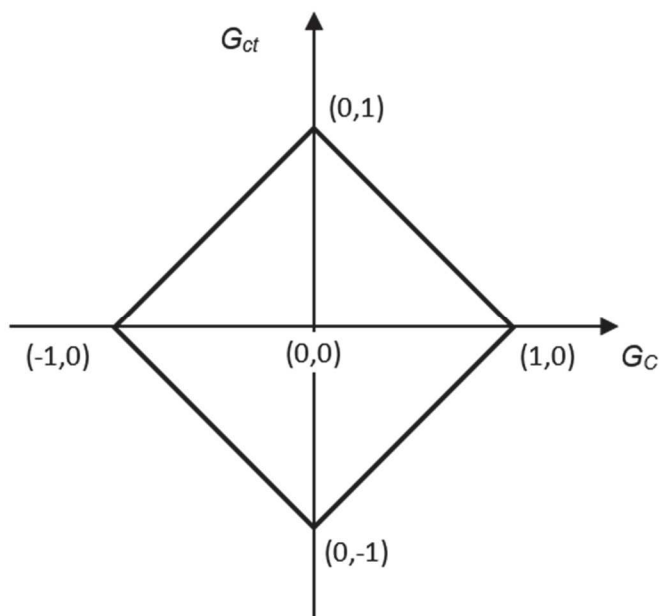


Figura 9 - Reticulado Representativo da LPA2v.
 Fonte: DA SILVA FILHO, ABE, TORRES, 2008,
 p. 26.

Os valores dos Graus de Certeza (G_C) pertencem ao conjunto R , variam no intervalo fechado $+1$ e -1 e estão no eixo horizontal do reticulado, o qual é denominado de *eixo dos Graus de Certeza*. Por sua vez, os valores dos Graus de Contradição (G_{Ct}), também, pertencem ao conjunto R , variam no intervalo fechado $+1$ e -1 , mas estão no eixo vertical do reticulado, o qual é denominado de *eixo dos Graus de Contradição*.

A presença de incerteza em um sistema baseado em processamento de conhecimento pode ser ocasionada por uma variedade de fontes de informação. Entre elas pode-se citar aquelas que são de confiabilidade parcial; aquelas que apresentam imprecisão inerente a linguagem de representação na qual a informação é expressa, aquelas que não oferecem completeza da informação e aquelas que agregam ou sumarizam informação que provêm de múltiplas fontes [DA SILVA FILHO, 2012, p. 147; DA SILVA FILHO, ABE, TORRES, 2008, p. 40].

Assim, de acordo com Da Silva Filho, Abe e Torres (2008, p. 43-66), no Sistema de Análise Paraconsistente para tomada de decisão, faz-se necessário o tratamento de incertezas considerando-se todas as informações, sejam elas incompletas, indefinidas ou inconsistentes.

E como, após uma análise paraconsistente, são obtidos os valores para o Grau de Certeza (G_C) e para o Grau de Contradição (G_{ct}), tem-se que, se o Grau de Contradição for diferente de 0 (zero), haverá variação (para menor), no valor do Intervalo de Certeza. Então, existirá no eixo de valores de certeza, um Grau de Certeza de valor máximo para condição extrema do vértice que considera um estado lógico *Verdadeiro* e o de valor máximo que considera o estado lógico *Falso* – ver Figura 10.

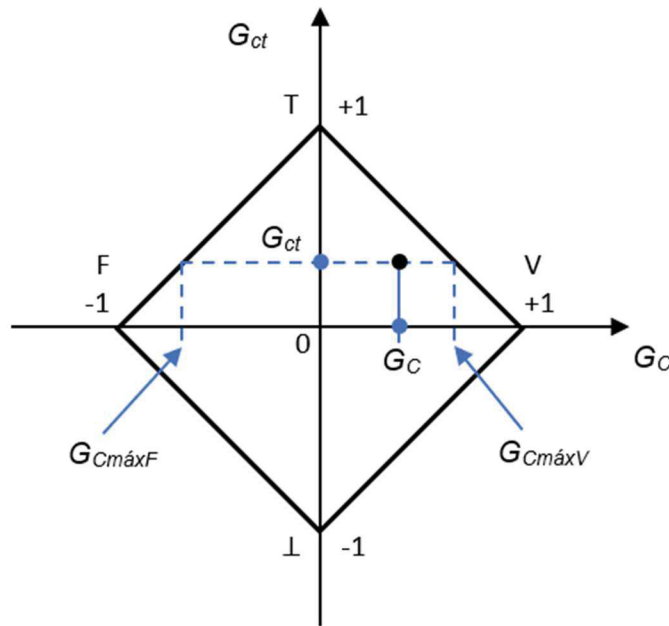


Figura 10 - Representação no Reticulado do Intervalo de Certeza.
Fonte: DA SILVA FILHO, ABE, TORRES, 2008, p. 45.

É possível representar, por tanto, um intervalo de valores de certeza, onde o Grau de Certeza pode variar, sem que este seja limitado pelo Grau de Contradição. Este intervalo, representado por φ , pode ser calculado por:

$$\varphi = 1 - |G_{ct}| \quad (13)$$

A partir destas observações, pode-se definir uma representação do chamado Grau de Certeza resultante (G_{Cr}):

$$G_{Cr} = \begin{bmatrix} G_C \\ \varphi (\pm) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Um sistema de decisão capaz de analisar dados originários de conhecimento incerto, terá maior robustez quando apresentar um valor de certeza puro, ou seja, não contaminado pelos efeitos da incerteza. Isto é possível subtraindo do G_C o valor atribuído ao efeito da influência das inconsistências originadas pelas informações conflitantes. Ao valor obtido, denomina-se Grau de Certeza Real (G_{CR}):

$$G_{CR} = (1 - D) \quad (15)$$

Sendo que, G_{CR} representa o Grau de Certeza livre do efeito da contradição e a *distância* D , a reta que vai do ponto de máximo Grau de Certeza V (vértice direito do reticulado), até o ponto de interpolação (G_C , G_{ct}), conforme pode ser observado na Figura 11 (também estão representados no eixo, abaixo do reticulado, os sinais de entradas utilizados para se determinar os Graus de Certeza e de Contradição).

Para o cálculo do valor da *distância* D , representada na Figura 11, pode-se utilizar a Equação (16):

$$D = \sqrt{(1 - |G_C|)^2 + G_{ct}^2} \quad (16)$$

Deve-se atentar, da Figura 10 e da Figura 11, que os valores de G_{ct} negativo não modificam a forma de obtenção de G_{CR} . No entanto, o mesmo não ocorre para valores negativos de G_C . Assim, o valor do Grau de Certeza Real G_{CR} é obtido a partir da determinação da *distância* D que, de acordo com os valores de G_C , pode ser calculado através das seguintes condições:

Para $G_C > 0$:

$$G_{CR} = 1 - \sqrt{(1 - |G_C|)^2 + G_{ct}^2} \quad (17)$$

Para $G_C < 0$:

$$G_{CR} = \sqrt{(1 - |G_C|)^2 + G_{ct}^2} - 1 \quad (18)$$

Da mesma forma, para que a resposta em um algoritmo NAP seja padronizada, também é feita uma normalização para o Grau de Contradição. Assim, o Grau de Contradição resultante pode ser determinado por:

$$\mu_{ctr} = \frac{G_{ct}+1}{2} \quad ou \quad \mu_{ctr} = \frac{((\mu+\lambda)-1)+1}{2} \quad (20)$$

Portanto:

$$\mu_{ctr} = \frac{\mu+\lambda}{2} \quad (21)$$

Sendo que: μ_{ctr} = Grau de Contradição Normalizado; μ = Grau de Evidência favorável; e λ = Grau de Evidência desfavorável.

Conforme se pode observar pela Equação (20), quando não existe contradição entre os graus de evidência na entrada (ou seja, $G_{ct} = (\mu + \lambda) - 1 = 0$), o valor do Grau de Contradição Normalizado será igual a 0,5.

Já para o Intervalo de Evidência resultante (φ_E), a partir das Equações (13) e (20), tem-se que:

$$\varphi_E = 1 - |2\mu_{ctr} - 1| \quad (22)$$

E, de acordo com a Equação (22), quando o Grau de Contradição Normalizado for igual a 1 (um), indicando alta contradição na análise paraconsistente com estado lógico *Inconsistente*, o valor do Intervalo de Evidência resultante será igual a 0 (zero). Já no caso de $\mu_{ctr} = 0$ (alta contradição na análise paraconsistente com estado lógico *Indeterminado*), o valor de φ_E , novamente, será igual a 0 (zero). Finalmente, quando $\mu_{ctr} = 0,5$ (não existe contradição na análise paraconsistente), o valor de φ_E será igual a 1 (um).

Na Figura 12, tem-se uma representação em bloco de um típico algoritmo da Lógica Paraconsistente Anotada. Este algoritmo também é conhecido como Algoritmo de Análise Paraconsistente com LPA2v para determinação do valor de Grau de Certeza Real e do Intervalo de Certeza [DA SILVA FILHO, ABE, TORRES, 2008, p. 81].

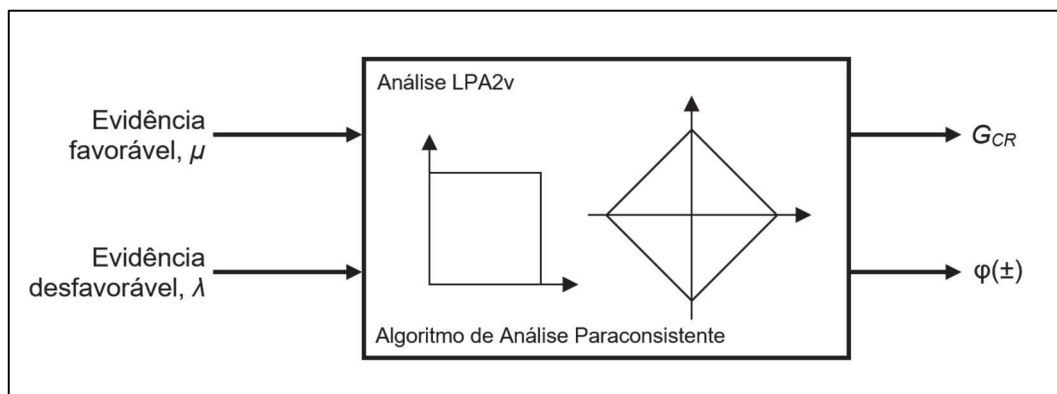


Figura 12 - Representação em Bloco do Algoritmo de Análise com LPA para G_{CR} .
Fonte: Adaptado de DA SILVA FILHO, ABE, TORRES, 2008, p. 64, 70.

Algoritmos paraconsistentes (ou seja, que utilizam a LPA), são denominados de Sistemas ou Nós de Análise Paraconsistente (NAP's). O algoritmo NAP é um dos fundamentos mais importantes da LPA2v e permite a partir de dois sinais de informações, conforme foi visto através das Equações (11) a (22), obter o Grau de Evidência Resultante na saída. Quando interligados, NAP's compõem as Redes de Análise Paraconsistente (RAP). A seguir, é descrito o Algoritmo de Análise Paraconsistente com LPA2v para determinação do valor de Grau de Certeza Real e do Intervalo de Certeza.

Algoritmo NAP Típico – Nó de Análise Paraconsistente

1. Apresente os dois valores normalizados provenientes das fontes de informação:

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

2. Calcule o Grau de Evidência desfavorável:

$$\lambda_1 = 1 - \mu_2.$$

3. Calcule o Grau de Certeza:

$$G_C = \mu_1 - \lambda_1.$$

4. Calcule o Grau de Contradição:

$$G_{ct} = (\mu_1 + \lambda_1) - 1$$

5. Calcule a distância D:

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

6. Considere a restrição:

Se $D > 1$, então faça $S_1 = 0,5 \rightarrow$ *Considerar indefinição na saída!*

Se não, vá para o próximo item.

7. Determine o Grau de Certeza Real:

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

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

8. Calcule o Grau de Evidência Resultante:

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

9. Apresente o resultado na saída S_1 :

Faça $S_1 = \mu_{ER}$

10. Fim.

Na Figura 13, tem-se a representação simbólica da configuração de uma RAP simples, utilizada por Oliveira e Da Silva Filho (2022, p. 55504), formada pela interligação de três algoritmos NAP (ou seja: NAP_1 , NAP_2 e NAP_3), para análise paraconsistente do problema de vibração em sistemas de tubulações. É possível observar as proposições (P_1 , P_2 e P_3), consideradas na análise paraconsistente de cada nó da rede.

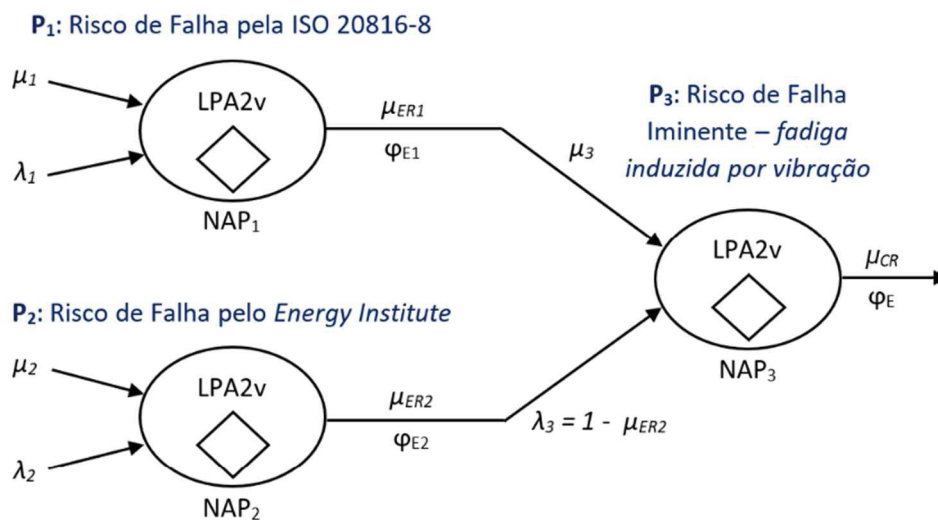


Figura 13 - Exemplo de RAP para o Problema de Vibração em Tubulações.
 Fonte: Adaptado de DA SILVA FILHO, ABE, TORRES, 2008, p. 139.

No exemplo da Figura 13, a Rede de Análise Paraconsistente é alimentada com duas fontes de informações diferentes que, depois de normalizados, se tornam nos Graus de Evidências favoráveis e desfavoráveis (μ_1, λ_1, μ_2 e λ_2). Enquanto o algoritmo do NAP₁ receberá os dados referentes a velocidade de vibração global medidos na tubulação que está se analisando, por sua vez, o algoritmo do NAP₂ receberá a velocidade de vibração medida em função do espectro de frequência.

Neste caso, para valoração dos graus de evidências favoráveis e desfavoráveis da primeira camada (relacionados às proposições P_1 e P_2 – respectivamente, existe “*risco de falha segundo a metodologia da ISO 20816-8*” e existe “*risco de falha segundo a metodologia do Energy Institute*”), será necessário considerar os critérios de aceitação destas duas diretrizes, conforme apresentados no item 1.3.1 do presente trabalho.

O tratamento, modelamento e normalização dos sinais das fontes de informação que geram os graus de evidência favorável e desfavorável para as análises na RAP são feitos de acordo com a natureza da aplicação. Nesta pesquisa os processos de normalização e modelamento para os sinais de entrada encontram-se demonstrados no Capítulo de Materiais e Métodos.

No entanto, para predição da falha por VIF na tubulação, será necessário utilizar um segundo algoritmo – o Algoritmo Analisador de Tendência de Risco (NAP₅), para determinação do Grau de Evidência de Risco Resultante e do Grau de Tendência de Risco – respectivamente ($\mu_{ERrisco}$, μ_{tend}). Estes dois valores são obtidos a partir de três valores consecutivos para o Grau de Evidência de Certeza Real Resultante (μ_{CR4}) – fontes de informações para alimentar o algoritmo do NAP₅, aqui denominado como Grau de Evidência de Risco (μ_{risco}) [DA SILVA FILHO; CAMARGO; SANTOS; *et al*, 2016, p. 1996-1997].

No Algoritmo Analisador de Risco, valores normalizados ($\mu_{risco\ n}$, $\mu_{risco\ n+1}$), são inseridos em um Nó de Análise Paraconsistente, tendo como resultado o Grau de Evidência de Risco Resultante ($\mu_{ERrisco}$). Conforme já mencionado, os valores de entrada para este algoritmo (NAP₅), correspondem aos Graus de Evidências de Risco e foram obtidos a partir dos resultados de saída da Rede de Análise Paraconsistente ilustrada na Figura 22, utilizada no presente trabalho (conforme será visto no Capítulo de Materiais e Métodos). Estes valores, portanto, são selecionados a partir de três medições da velocidade de vibração consecutivas:

$\mu_{risco\ n-1}$ – *risco anterior*, $\mu_{risco\ n}$ – *risco atual* e $\mu_{risco\ n+1}$ – *risco posterior* ao tempo definido como t_n . A Figura 14 ilustra o NAP₅, com a proposição P_5 : Risco de Falha por VIF.

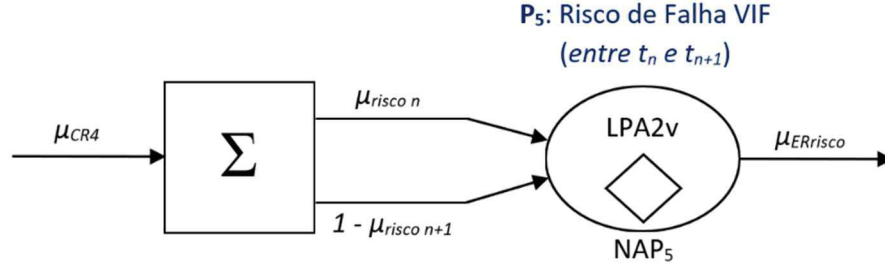


Figura 14 - NAP para determinação do Grau de Evidência de Risco Resultante. Este NAP armazenará as saídas da rede proposta na Figura 22 e utiliza o Algoritmo Analisador de Tendência de Risco, para cada três leituras consecutivas, calculando o Grau de Risco Resultante ($\mu_{ERrisco}$) e o Grau de Tendência de Risco (μ_{tend}).

Se o Grau de Evidência de Risco Resultante ($\mu_{ERrisco}$), for maior que o Grau de Evidência de Risco “n” ($\mu_{risco\ n}$), significa que existe tendência de incremento do risco – caso contrário, a tendência é de redução do risco.

Considerando-se que existe uma tendência de aumento no risco de falha por VIF, pode-se calcular o Grau de Tendência de Risco (μ_{tend}) através das seguintes equações:

$$\mu_{tend} = \frac{(x - \mu_{risco\ n})}{(\mu_{risco\ n+1} - \mu_{risco\ n})}, \quad (23)$$

$$se\ x \in [\mu_{risco\ n}, \mu_{risco\ n+1}]$$

$$\mu_{tend} = 0, \quad se\ x < \mu_{risco\ n} \quad (24)$$

$$\mu_{tend} = 1, \quad se\ x > \mu_{risco\ n+1} \quad (25)$$

Para tanto, será necessário determinar o valor de “x”:

$$x = (\mu_{risco\ n+1} - \mu_{ctr\ risco}) + \mu_{risco\ n-1} \quad (26)$$

Sendo que, $\mu_{ctr\ risco}$ corresponde ao Grau de Contradição normalizado para o intervalo de evidência entre o instante t_n e o instante t_{n+1} , calculado pelas Equações (27) e (28):

$$G_{ct} = (\mu_{risco\ n} + (1 - \mu_{risco\ n+1})) - 1 \quad (27)$$

$$\mu_{ctr\ risco} = \frac{(G_{ct}+1)}{2} \quad (28)$$

Assim, lembrando que o intervalo de tempo entre duas medições da velocidade de vibração é constante ($\Delta t = t_n - t_{n-1} = t_{n+1} - t_n = const.$), é possível linearizar os valores obtidos para o Grau de Evidência de Risco Resultante ($\mu_{ERRisco}$), naqueles intervalos em que o Grau de Tendência de Risco (μ_{tend}) for igual a 1 (um), com o objetivo de se predizer em quanto tempo $\mu_{ERRisco}$ será igual ao valor admissível, a partir do instante t_{n+1} . Ou seja, é possível predizer quando o nível de vibração na tubulação alcançará valores críticos para a iminência do risco de falha por VIF.

Para obtenção e padronização das fontes de informações utilizadas como Graus de Evidência na RAP proposta e, consequente validação da mesma, foi utilizado um estudo de caso para uma falha real por VIF em uma tubulação de um sistema de compressão. Maiores detalhes são apresentados no Capítulo de Materiais e Métodos – conforme Equações (30) a (44) e Figura 22.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Para estimativa dos dados de entrada do presente estudo, foi utilizado o software CAESAR II® v. 11 (2019), desenvolvido pela HEXAGON®, para modelagem computacional e análise dinâmica de um trecho de tubulação (referente a linha de sucção do segundo estágio de compressão), e que faz parte do sistema de compressão de gás em uma planta de diesel, que opera com compressores alternativos (relatórios da análise disponíveis no Apêndice da dissertação).

Também foram utilizados dados experimentais e de inspeção (para um caso real de ocorrência de falha na tubulação citada acima), necessários para calibração do modelo computacional 3D. Tais dados foram obtidos pela equipe de medição de vibração em tubulações da PETROBRAS, e disponibilizados na forma de artigos e de dissertação de mestrado [MEDEIROS; MENDONÇA; TINOCO, 2020; OLIVEIRA; PACHECO, 2022; MENDONÇA, 2020].

2.2. Métodos

A partir de valores reais para medição de vibração na tubulação do segundo estágio de sucção de um sistema de compressão, dotado de compressor alternativo de grande porte (Marca Howden, Série C, Modelo C-85, Capacidade 24.800 kW), foi feita a calibração do modelo computacional 3D desta tubulação, através do software de análise de flexibilidade CAESAR II® v. 11 (2019).

O sistema de compressão faz parte de uma unidade de processamento de diesel, instalada na Refinaria Presidente Bernardes, em Cubatão - SP. Na Figura 15, tem-se uma ilustração do compressor alternativo utilizado na refinaria. Este equipamento também é utilizado em plantas de processo (*topside*), de unidades de produção *offshore* (FPSO).

A tubulação de sucção do segundo estágio do compressor (ilustrada na Figura 16), apresentou falha por VIF em uma tomada de instrumentação durante a pré partida da unidade. Esta tubulação tem a linha principal fabricada com tubos de aço

carbono (ASTM A106 Gr. B), NPS 10 pol e Classe de Pressão 300#. Já a derivação utilizada como tomada de instrumentação, possui NPS 1 pol e SCH 160.

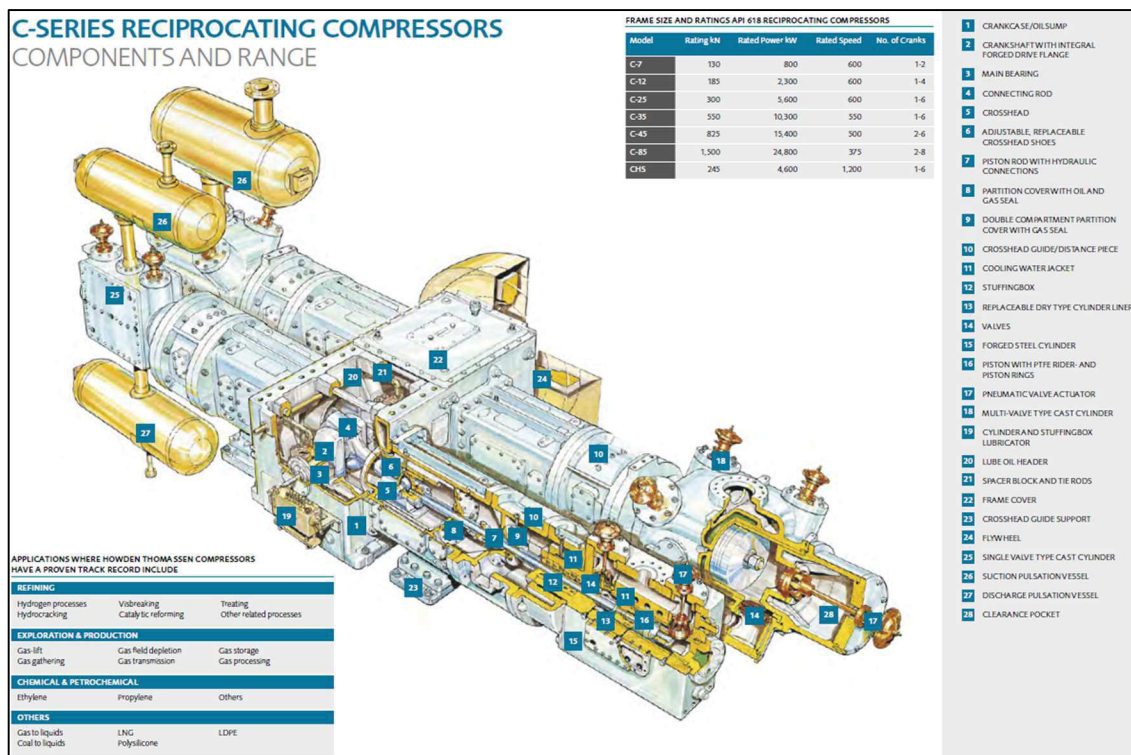


Figura 15 - Compressor Alternativo Utilizado na Unidade de Diesel da Refinaria. Marca Howden, Série C, Modelo C-85, 4 Cilindros, Capacidade 24.800 kW. Fonte: Catálogo da Howden Thomassen Compressors (www.thomassen.com).

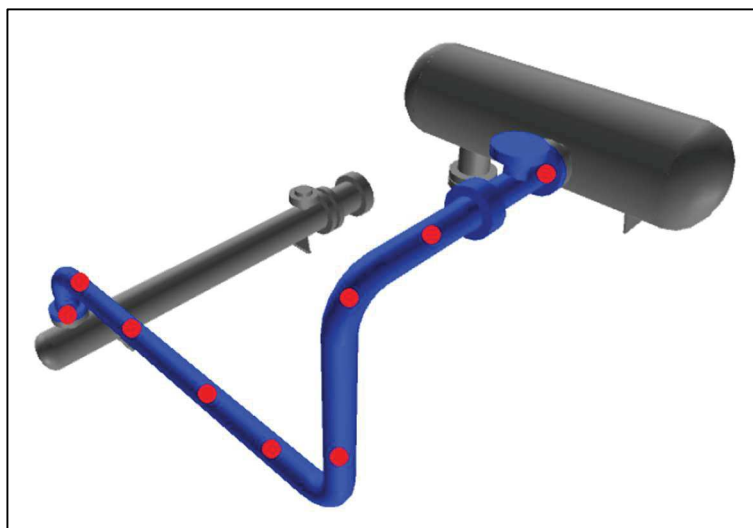


Figura 16 - Tubulação de Sucção do Segundo Estágio. A tubulação encontra-se na cor “azul”. Os pontos vermelhos são os locais onde foram realizadas medições de vibração em campo (área operacional). Fonte: MENDONÇA, 2020, p. 62.

Ainda, de acordo com a Figura 16, a tubulação está conectada à montante com o permutador de calor de inter estágio, do tipo casco e tubo. À jusante, a mesma se conecta com o vaso absorvedor de pulsação, na sucção do segundo estágio do compressor. As indicações em vermelho na tubulação, são os pontos onde foram realizadas as medições das velocidades de vibração, através de acelerômetros pela equipe de inspeção em campo, durante atividades de pré partida e comissionamento da unidade de compressão.

Na Figura 17 tem-se um registro fotográfico do local da falha. Conforme se pode observar, a falha ocorreu em *junta soldada* de conexão (*weldolet*), para derivação de pequeno diâmetro (tomada de instrumento).



Figura 17 - Conexão da Tubulação onde Ocorreu Falha por VIF. Conforme se pode observar, a falha ocorreu na junta soldada de conexão para derivação de pequeno diâmetro.
Fonte: Acervo da PETROBRAS.

Na Figura 18, tem-se um *print* (recorte) do isométrico da tubulação de sucção do segundo estágio, com suas principais dimensões – necessárias para elaboração do modelo computacional 3D pelo CAESAR II® v. 11 (2019).

Após a modelagem computacional da tubulação no CAESAR II® v. 11 (2019) (ver Figura 19), foram introduzidas as condições de contorno para o modelo. Para o flange conectado ao permutador de calor, se utilizou como condição de contorno um ponto de ancoragem rígida (devido a robustez do equipamento), ou seja, restrição nos seis graus de liberdade.

Para a suporta  o da tubula  o, utilizou-se um suporte tipo guia, que oferece restri  es a movimentos no eixo vertical e lateralmente, com um coeficiente de atrito igual a 0,3 para os movimentos axiais da tubula  o.

Finalmente, para o flange conectado ao amortecedor de pulsa  o, de acordo com o que foi observado em campo, foi necessário estimar uma condi  o de contorno com rigidez inferior ao ponto de ancoragem (condi  o de contorno que restringe os seis graus de liberdade). Para o ajuste do modelo, foram utilizadas as frequências naturais de vibra  o da tubula  o, obtidas experimentalmente no campo (através de *bump test*) [MENDONÇA, 2020, p. 65].

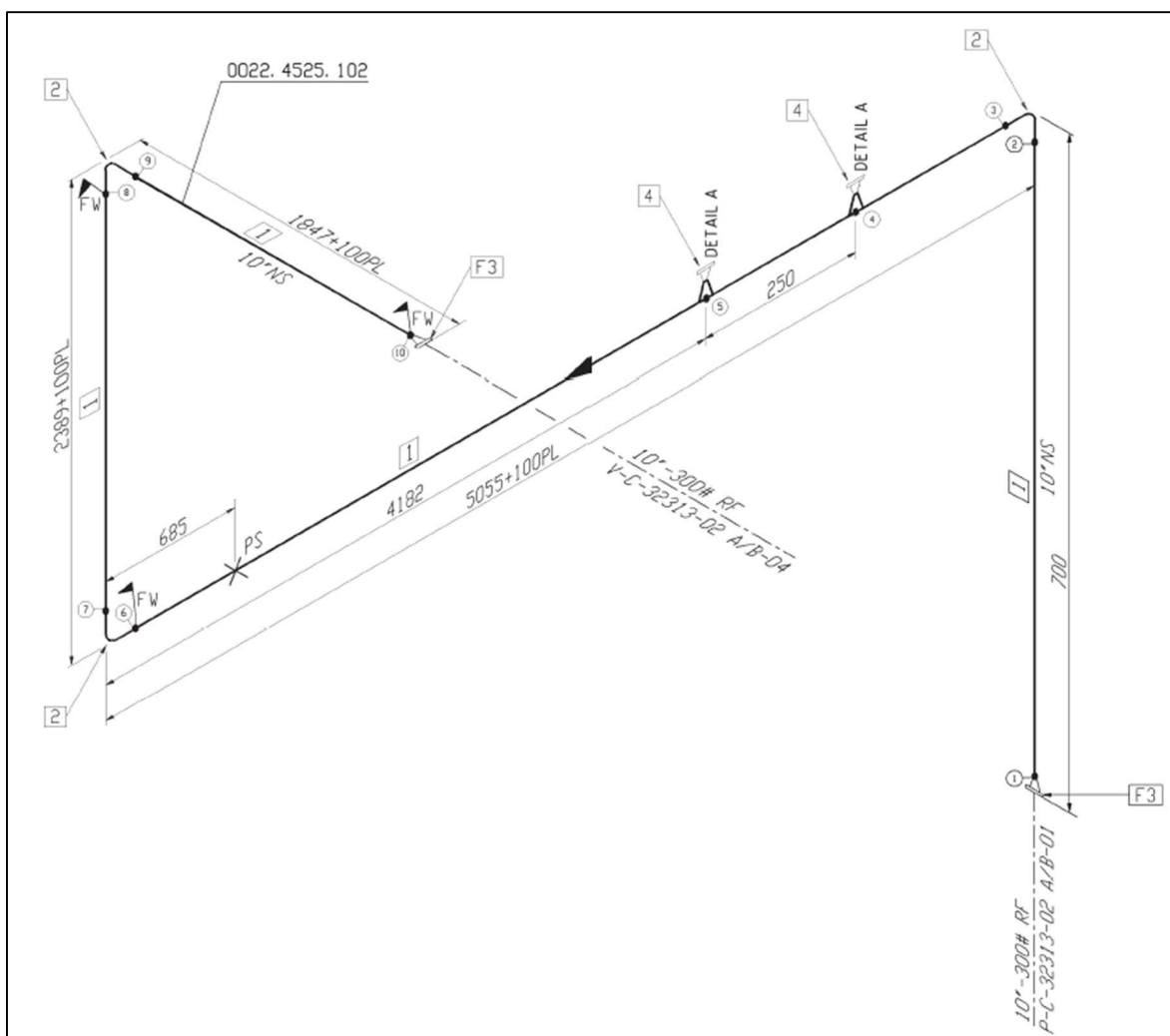


Figura 18 - Isométrico da Tubula  o de Suc  o do Segundo Estágio. A conexão onde ocorreu falha (Figura 17), diz respeito a conexão identificada como item de material número 4 (primeiro *weldolet* da esquerda para a direita), na junta soldada número 5 do isométrico. Fonte: DataBook do equipamento.

Desta forma, o modelo no CAESAR II® v. 11 (2019) foi calibrado arbitrando-se valores de rigidez para o flange conectado ao amortecedor de pulsação, e selecionando-se aquele que apresentasse (na análise modal), as frequências naturais de vibração mais próximas daquelas obtidas experimentalmente. Assim, para ajuste do modelo, foi introduzido no flange do amortecedor de pulsação, uma restrição (condição de contorno), com rigidez igual a 6×10^6 N/cm.

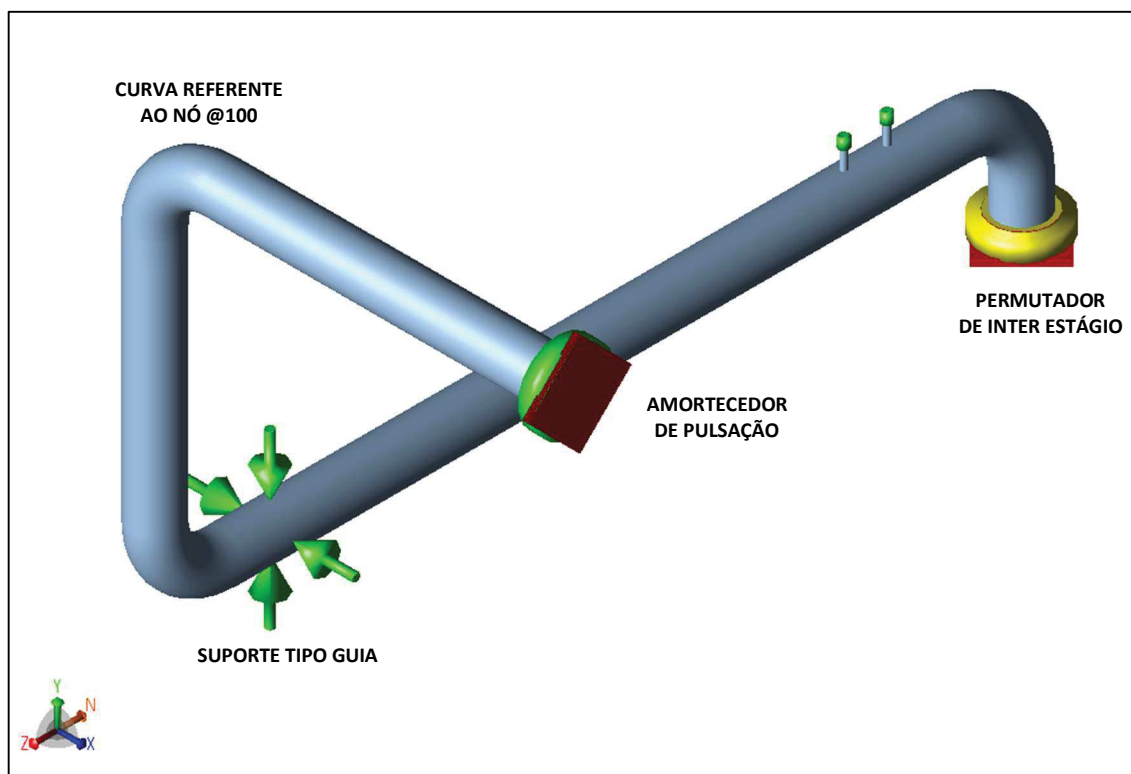


Figura 19 - Modelo 3D para Linha de Sucção do Segundo Estágio no CAESAR II®. Observa-se as condições de contorno para o modelo, a saber: flange do permutador de inter estágio, flange do vaso amortecedor de pulsação e suporte da tubulação tipo guia. Também está indicado na figura, a “curva” correspondente ao nó @100 no modelo computacional 3D – esta é a conexão da tubulação onde a inspeção mediu as maiores velocidades de vibração.

Fonte: *Print* da tela do software CAESAR II® v. 11 (2019).

Das atividades de medição de vibração realizadas pela equipe de inspeção, além das frequências naturais de vibração para a tubulação (utilizadas no ajuste do modelo), três outras importantes informações eram conhecidas:

- a) local onde a velocidade de vibração medida era máxima (nó @100 do modelo computacional 3D);
- b) direção da máxima velocidade de vibração (eixo “Z”); e

c) qual a frequência de resposta associada a esta velocidade (30,9 Hz).

Assim, com o modelo computacional 3D já calibrado, foi possível aplicar um determinado deslocamento harmônico no flange do amortecedor de pulsação, na direção “Z”, na frequência de excitação correspondente ao funcionamento do compressor ($6,25 \text{ Hz}^2$), e extrair do mesmo, o deslocamento resultante no ponto correspondente ao nó @100. Este nó corresponde a “curva” 90° de raio longo, localizada próximo ao flange do vaso amortecedor de pulsação, conforme se pode observar através das figuras já apresentadas – respectivamente, Figura 16, Figura 18 e Figura 19 [HEXAGON PPM, 2017, p. 84-110].

Medeiros, Mendonça e Tinoco (2020, p. 7), também analisaram os dados obtidos pela equipe de campo e, através de simulação numérica, encontraram o mesmo comportamento para tubulação de sucção do segundo estágio em análise modal, conforme ilustração reproduzida na Figura 20.

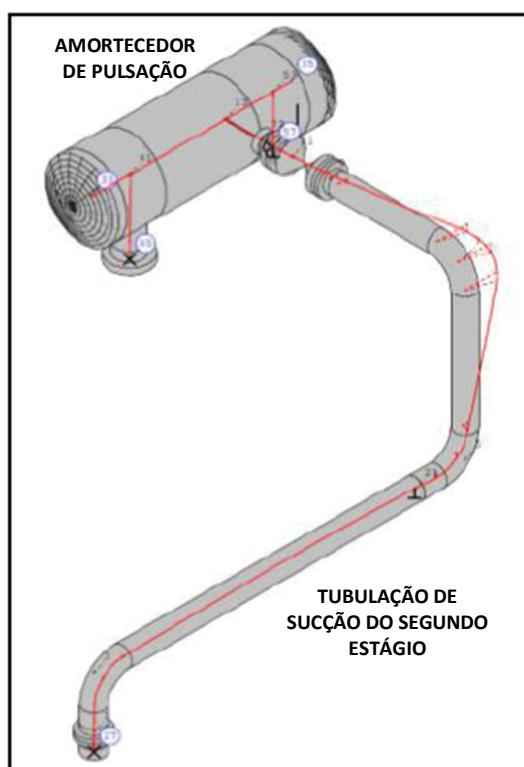


Figura 20 - Resposta em Modelo 3D para Segundo Modo de Vibração.
Fonte: Adaptado de MEDEIROS, MENDONÇA e TINOCO, 2020, p. 7.

² De acordo com os dados do compressor na Figura 15, o Modelo C-85 opera com 375 RPM, que corresponde a 6,25 rotações por segundo, ou 6,25 Hz.

O deslocamento harmônico, a pouco mencionado, que fora aplicado (no modelo computacional 3D), diretamente no flange da tubulação que se conecta ao vaso amortecedor de pulsação, tem por objetivo simular a vibração mecânica imposta à tubulação pelo compressor alternativo – ver Figura 21. Observa-se da figura, que o deslocamento imposto se dá, apenas, em única direção (eixo Z).

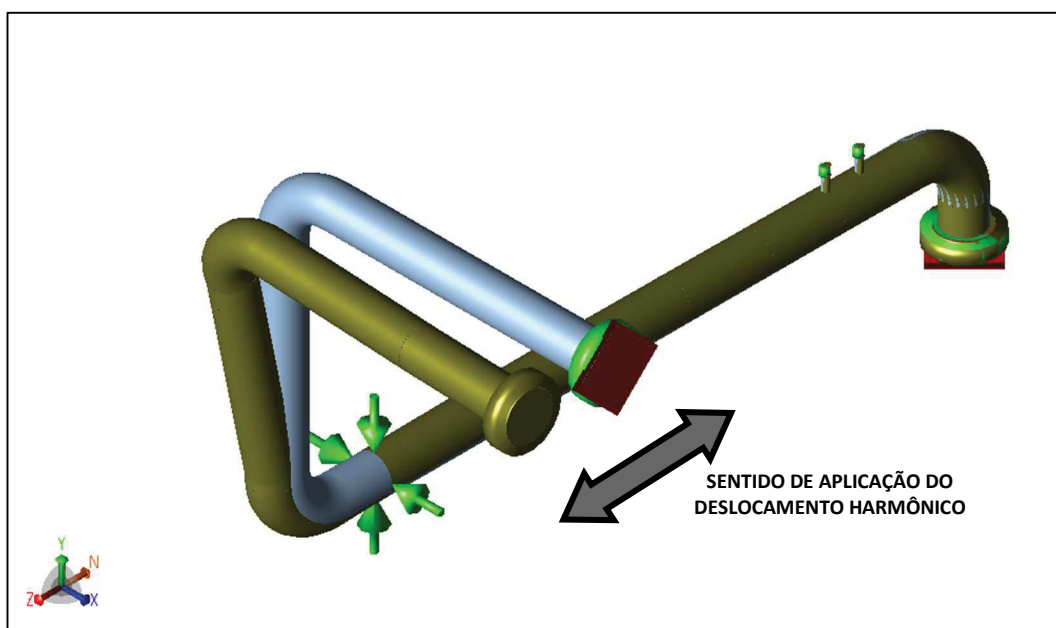


Figura 21 - Aplicação de Deslocamento Harmônico no Modelo 3D. Observa-se que o deslocamento imposto ocorre apenas no eixo Z, ou seja, em uma única direção.
 Fonte: *Print* da tela do software CAESAR II® v. 11 (2019).

O valor inicialmente estimado para o deslocamento harmônico no instante t_0 , utilizou como referência a amplitude de deslocamento esperada para o absorvedor de pulsação (também conhecido como vaso *damper*), operando em regime estacionário, na condição “conforme projetado” – *as-designed*, de acordo com diretrizes de vibração para fabricantes de compressores alternativos [EUROPEAN FORUM RECIPROCATING COMPRESSORS, 2009, p. 12].

A partir do instante t_0 , variou-se a amplitude do deslocamento harmônico no flange de descarga do vaso absorvedor de pulsação e, conseqüentemente, a excitação imposta à tubulação de sucção do segundo estágio (uma vez que o flange de descarga do vaso se encontra, mecanicamente, acoplado ao flange da tubulação em estudo). Para esta variação, arbitrou-se um incremento exponencial na amplitude do deslocamento da vibração e orientado na direção do eixo “Z”, por

um intervalo de operação do equipamento de, aproximadamente, 3 (três) anos. É importante ressaltar que a direção do eixo “Z” corresponde a direção da máxima velocidade de vibração, observada no nó @100 da tubulação, e que o tempo, usual, para uma campanha de operação de uma planta de processo, na indústria de óleo e gás, é de 3 (três) anos, ou seja, a cada 36 (trinta e seis) meses as unidades operacionais costumam entrar em parada programada para manutenção planejada.

A variação da amplitude de deslocamento no modelo computacional 3D, teve um incremento no nível de vibração do tipo exponencial, para simular no compressor o modo de falha da “curva da banheira”, e obedeceu, ainda, determinadas condições operacionais arbitradas e distintas. Inicialmente, foram estabelecidas três condições operacionais, denominadas como Caso #1, Caso #2 e Caso #3. A seguir, será apresentada uma breve descrição para cada uma destas três condições operacionais:

Caso #1 – a partir de um nível de vibração esperada para um compressor alternativo novo (condição de projeto), com deslocamentos (X_{0-pico}), abaixo de 0,2 mm, foram introduzidos (exponencialmente), incrementos no deslocamento harmônico do flange de descarga do vaso absorvedor de pulsação – considerando um modelo de falha conforme o terceiro estágio da “Curva da Banheira”, durante um período de operação de, aproximadamente, 3 (três) anos. Neste caso, o nível de vibração (deslocamento) excedeu, rapidamente, os limites “marginal” e “inaceitável” para o equipamento (respectivamente, 0,427 e 0,642 mm 0-pico), conforme estabelecido em diretrizes internacionais para vibração de compressores alternativos [EUROPEAN FORUM RECIPROCATING COMPRESSORS, 2009, p. 12].

Caso #2 – a partir de um nível de vibração esperada para um compressor alternativo novo (condição de projeto), com deslocamentos (X_{0-pico}), abaixo de 0,2 mm, foram introduzidos (exponencialmente), incrementos no deslocamento harmônico do flange de descarga do vaso absorvedor de pulsação – considerando um modelo de falha conforme o terceiro estágio da “Curva da Banheira”, até que o nível de vibração atingisse o limite “inaceitável” para o equipamento ($X_{0-pic} = 0,642$ mm), conforme estabelecido em normas internacionais [EUROPEAN FORUM

RECIPROCATING COMPRESSORS, 2009, p. 12]. Neste momento, foi simulado uma intervenção bem-sucedida para manutenção no equipamento, restabelecendo as condições iniciais de operação (típica manutenção preditiva).

Caso #3 – similar ao caso anterior, exceto pelo fato de que a intervenção não foi bem-sucedida, devido a uma suposta falha de montagem ou má qualidade dos sobressalentes utilizados na manutenção do compressor alternativo. Como consequência, após a intervenção no equipamento, o nível de vibração retornou à condição inicial por um curto período, para logo em seguida, voltar a crescer rapidamente (inclusive, em uma razão de incremento superior a inicial), excedendo os limites “marginal” e “inaceitável” para o equipamento (respectivamente: 0,427 e 0,642 mm 0-pico), conforme estabelecido em diretrizes internacionais para vibração de compressores alternativos [EUROPEAN FORUM RECIPROCATING COMPRESSORS, 2009, p. 12].

Por fim, foram propostos mais dois casos, onde a condição referente ao Caso #1 foi refeita para uma razão de incremento na vibração do compressor ao longo do tempo, 50% e 25% menor que a utilizada no Caso #1– estas novas condições operacionais foram denominadas de Caso 50% e Caso 25%, respectivamente.

2.2.1. Sistema de Previsão

Para valoração dos graus de evidências favoráveis e desfavoráveis de entrada da RAP, foram considerados os valores para probabilidade ou predisposição à falha por VIF (LOF), conforme metodologia do Energy Institute (tanto para a linha principal, quanto para tubulação de pequeno diâmetro do sistema de tubulação em análise), relacionados as proposições P_1 : existe “*risco de falha VIF na linha principal*” e P_2 : existe “*risco de falha VIF na linha de derivação*”. Além do LOF, foram utilizados os valores para máxima velocidade de vibração na linha.

No caso da velocidade de vibração, a mesma foi valorada como Grau de Evidência favorável (μ_4), para o algoritmo do NAP₄ da rede proposta. Já o LOF, depois da aplicação da LPA2v nos NAP’s das duas primeiras camadas da RAP,

resultou no Grau de Evidência desfavorável (λ_4), para o algoritmo do NAP₄. A rede proposta obteve como resultado final o Grau de Certeza Real resultante para a proposição P_4 : existência de “*Risco de Falha Iminente por Fadiga Induzida por Vibração*”.

E para a representação do Grau de Evidência Resultante na saída de cada um dos nós ou algoritmos da rede (μ_{Es}):

$$\mu_{Es} = \begin{cases} \mu_{ER} \\ \varphi_{E(\pm)} \end{cases} \quad (29)$$

Sendo: μ_{ER} o Grau de Evidência Resultante Real e φ_E o Intervalo de Evidência resultante, que terá a seguinte sinalização:

$$\begin{aligned} \varphi_{E(-)} \text{ se } \mu_{ctr} < 0,5; \\ \varphi_{E(+)} \text{ se } \mu_{ctr} > 0,5; \end{aligned}$$

2.2.2. Configuração da RAP Utilizada

Na Figura 22, encontra-se ilustrado a configuração da Rede de Análise Paraconsistente proposta para o tratamento do problema de vibração em sistemas de tubulações através de diferentes fontes de informação.

Conforme já mencionado, é possível observar na rede da Figura 22, que os dados de entrada foram as velocidades de vibração ($\dot{X}_{RMS}$), e as probabilidades de falha (LOF), para a linha e principal e para a da derivação de pequeno diâmetro, conforme metodologia do EI Guidelines.

Em uma primeira camada, a partir dos valores do LOF para a linha principal e para conexão de derivação, os algoritmos do NAP₁ e NAP₂ determinaram o Grau de Evidência Resultante Real – μ_{ER} e μ_{ER} , respectivamente. Já o NAP₃, em uma segunda camada, determinou o Grau de Evidência Resultante Real para toda a tubulação, μ_{ER} (ou seja, linha principal + tubulação de pequeno diâmetro).

Por fim, uma última camada (algoritmo NAP₄), determinou o Grau de Evidência de Certeza Real Resultante (μ_{CR4}), a partir da velocidade de vibração RMS ($\dot{X}_{RMS}$), já normalizada, e do LOF resultante do algoritmo NAP₃.

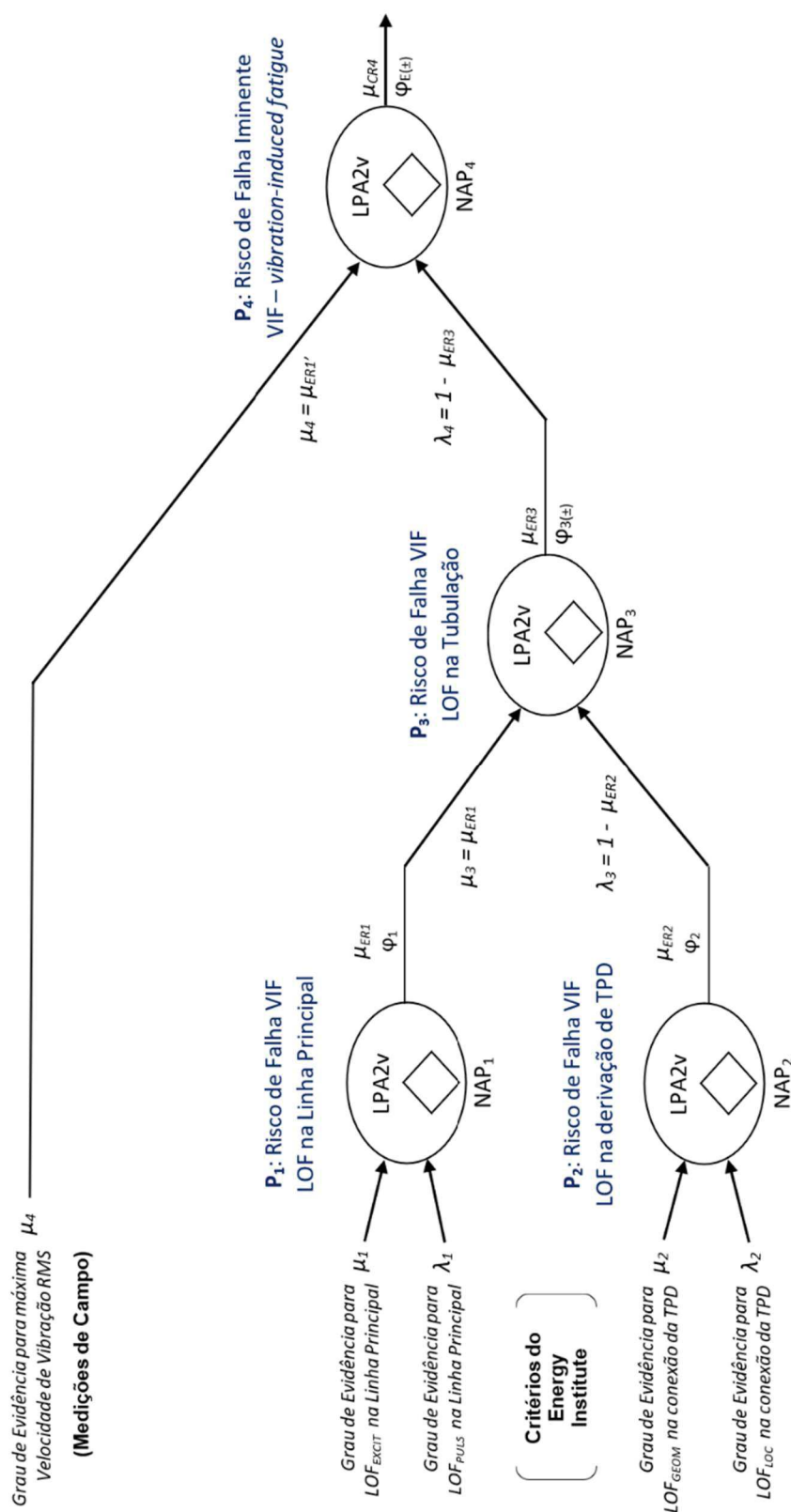


Figura 22 - Configuração da RAP para o Problema de Vibração em Tubulações. Esta rede utiliza a máxima velocidade de vibração RMS e o LOF resultante, de acordo com o EI Institute, como fontes de informação para o cálculo do Grau de Evidência de Certeza Real Resultante (μ_{CR4}).
Fonte: Adaptado de DA SILVA FILHO, ABE, TORRES, 2008, p. 102.

A Rede de Análise Paraconsistente proposta na Figura 22, foi a rede utilizada no presente estudo, sendo que, a velocidade máxima de vibração da tubulação, em função do espectro de frequência, ocorreu no nó @100 do modelo computacional 3D (conforme já mencionado anteriormente).

É importante ressaltar que, conforme visto no item 1.3.1, o risco de falha por VIF é maior nas conexões de derivações das linhas de pequeno diâmetro do que na linha principal de um sistema de tubulações, uma vez que nestas conexões as tensões atuantes são amplificadas devido a vibração da linha principal [SWINDELL, 2007, p. 2453-2544; HARPER, 2014, p. 1; KEPRATE e RATNAYAKE, 2016, p. 74].

Desta forma, para proposição do algoritmo NAP₄ (P₄: *Risco de Falha Iminente – vibration-induced fatigue*), a rede ilustrada na Figura 22, utiliza um número maior de dados de entrada como Graus de Evidência (do que, por exemplo, a rede ilustrada na Figura 13), o que contribui para maior robustez da análise em questão.

2.2.3. Normalização dos Dados de Entrada

Para a configuração de rede proposta, foi necessário estabelecer quais equações seriam utilizadas para o cálculo dos Graus de Evidência ($\mu_1, \lambda_1, \mu_2, \lambda_2$ e μ_4), em função dos níveis admissíveis pelo Energy Institute – para o LOF e para máxima velocidade de vibração ($\dot{X}_{RMS}$).

Assim, para os algoritmos da primeira camada (NAP₁ e NAP₂), foram utilizadas as Equações (30) à (44):

Grau de Evidência favorável para o algoritmo NAP₁ (*na linha principal*):

$$\mu_1 = 0, \text{ se } LOF_{EXCIT} < 0,3 \quad (30)$$

$$\mu_1 = \frac{(LOF_{EXCIT} - 0,3)}{(1,0 - 0,3)}, \text{ se } 1,0 > LOF_{EXCIT} \geq 0,3 \quad (31)$$

$$\mu_1 = 1, \text{ se } LOF_{EXCIT} \geq 1,0 \quad (32)$$

Grau de Evidência desfavorável para o algoritmo do NAP₁ (*na linha principal*):

$$\lambda_1 = 0, \text{ se } LOF_{PULS} \geq 1,0 \quad (33)$$

$$\lambda_1 = 1 - \frac{(LOF_{PULS} - 0,3)}{(1,0 - 0,3)}, \text{ se } 1,0 > LOF_{PULS} \geq 0,3 \quad (34)$$

$$\lambda_1 = 1, \text{ se } LOF_{PULS} < 0,3 \quad (35)$$

Grau de Evidência favorável para o algoritmo do NAP₂ (*na conexão de derivação*):

$$\mu_2 = 0, \text{ se } LOF_{GEO} < 0,4 \quad (36)$$

$$\mu_2 = \frac{(LOF_{GEO} - 0,4)}{(0,7 - 0,4)}, \text{ se } 0,7 > LOF_{GEO} \geq 0,4 \quad (37)$$

$$\mu_2 = 1, \text{ se } LOF_{GEO} \geq 0,7 \quad (38)$$

Grau de Evidência desfavorável para o algoritmo do NAP₂ (*na conexão de derivação*):

$$\lambda_2 = 0, \text{ se } LOF_{LOC} \geq 0,7 \quad (39)$$

$$\lambda_2 = 1 - \frac{(LOF_{LOC} - 0,4)}{(0,7 - 0,4)}, \text{ se } 0,7 > LOF_{LOC} \geq 0,4 \quad (40)$$

$$\lambda_2 = 1, \text{ se } LOF_{LOC} < 0,4 \quad (41)$$

Grau de Evidência favorável para o algoritmo do NAP₄ (*velocidade de vibração RMS*):

$$\mu_4 = 0, \text{ se } \dot{X}_{RMS} > 10^{\frac{(\log(f)+1,871083)}{2,084547}} \quad (42)$$

$$\mu_4 = \frac{\left(\dot{X}_{RMS} - 10^{\frac{(\log(f)+0,48017)}{2,127612}} \right)}{\left(10^{\frac{(\log(f)+1,871083)}{2,084547}} - 10^{\frac{(\log(f)+0,48017)}{2,127612}} \right)}, \quad (43)$$

$$se \dot{X}_{RMS} \in \left[10^{\frac{(\log(f)+0,48017)}{2,127612}}, 10^{\frac{(\log(f)+1,871086)}{2,084547}} \right]$$

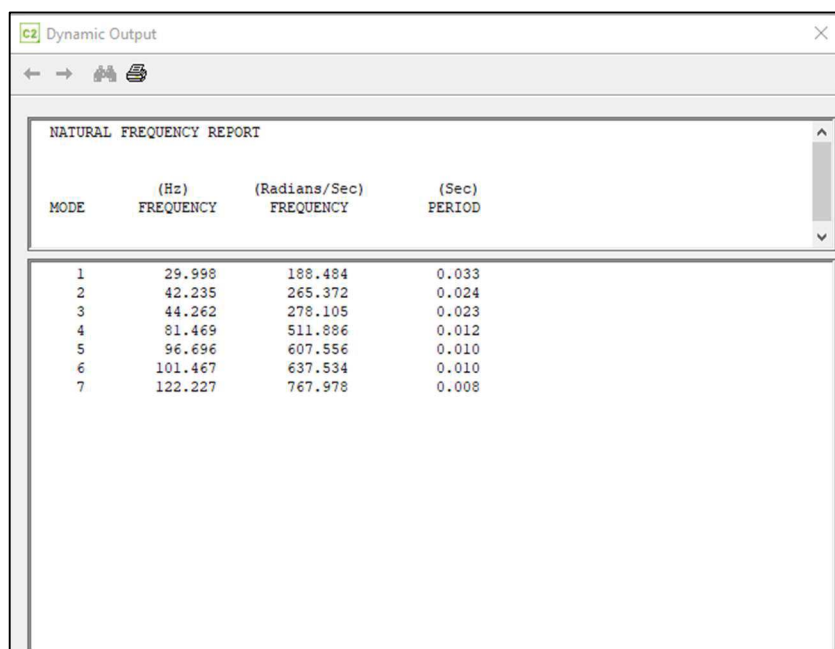
$$\mu_4 = 1, \quad se \dot{X}_{RMS} < 10^{\frac{(\log(f)+0,48017)}{2,127612}} \quad (44)$$

E, de acordo com os critérios do Energy Institute e das Equações (30) a (41), foram utilizados para a primeira camada da rede: $\mu_1 = 0,86$; $\lambda_1 = 0,0$; $\mu_2 = 0,867$ e $\lambda_2 = 0,0$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resultados

Após calibração do modelo computacional 3D no CAESAR II® v. 11 (2019), foram obtidos, por análise modal, os valores da frequência natural numérica para o sistema de tubulação, conforme Figura 23. Para efeito de comparação, tem-se na Tabela 4 os valores da frequência natural experimental (obtidas por *bump test*).



MODE	(Hz) FREQUENCY	(Radians/Sec) FREQUENCY	(Sec) PERIOD
1	29.998	188.484	0.033
2	42.235	265.372	0.024
3	44.262	278.105	0.023
4	81.469	511.886	0.012
5	96.696	607.556	0.010
6	101.467	637.534	0.010
7	122.227	767.978	0.008

Figura 23 - Resultados da Análise Modal no CAESAR II®.

Tabela 4 - Comparativo de Frequências Naturais (Numérica x Experimental).

Modo	Frequência Natural no CAESAR II® [Hz]	Frequência Natural de campo (<i>bump test</i>) [Hz]	Diferença
1	29,998	29,904	0,314%
2	42,235	42,187	0,114%
3	44,262	48,135	-8,046%
4	81,469	68,635	18,699%
5	96,696	89,661	7,846%
6	101,467	108,13	-6,162%
7	122,227	120,14	1,737%

Fonte: Adaptado MENDONÇA, 2020, p. 65.

Embora exista uma diferença considerável para alguns modos de vibração ilustrados na Figura 23 (por exemplo, para o quarto modo de vibração, a diferença entre a frequência natural numérica e a frequência natural experimental é da ordem de 20%), a inspeção de campo identificou que a tubulação respondeu de acordo com o primeiro modo de vibração e em uma frequência de vibração de 29,9 Hz (neste modo de vibração, a diferença entre a frequência natural numérica e a frequência natural experimental foi inferior a 0,5%).

A partir das condições operacionais propostas, inicialmente, para operação do compressor alternativo – conforme Caso #1, Caso #2 e Caso #3, foram estimadas curvas de excitação (deslocamento do bocal de descarga do vaso amortecedor de pulsação), para o sistema de tubulação. Os valores estimados para a excitação foram utilizados na simulação computacional via CAESAR II® v. 11 (2019), e encontram-se ilustrados, graficamente, conforme Figura 24, Figura 25 e Figura 26.

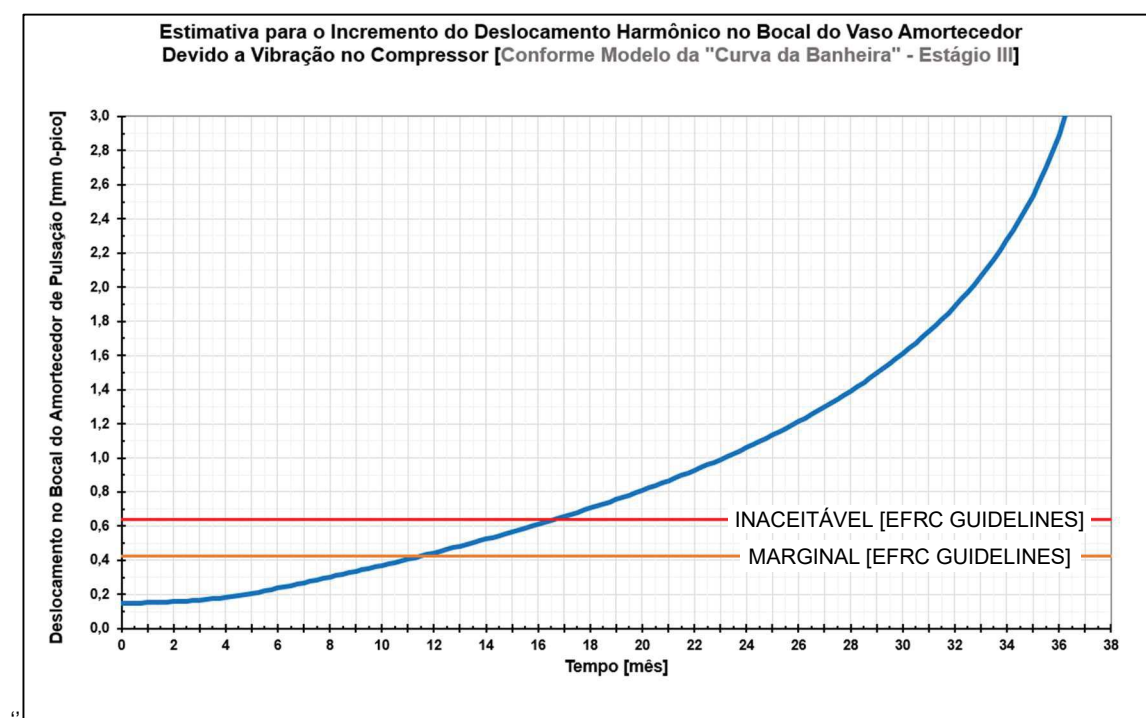


Figura 24 - Curva de Excitação do Vaso Amortecedor de Pulsação [Caso #1]. Incrementos exponenciais para um modelo de falhas conforme estágio final da "Curva da Banheira".

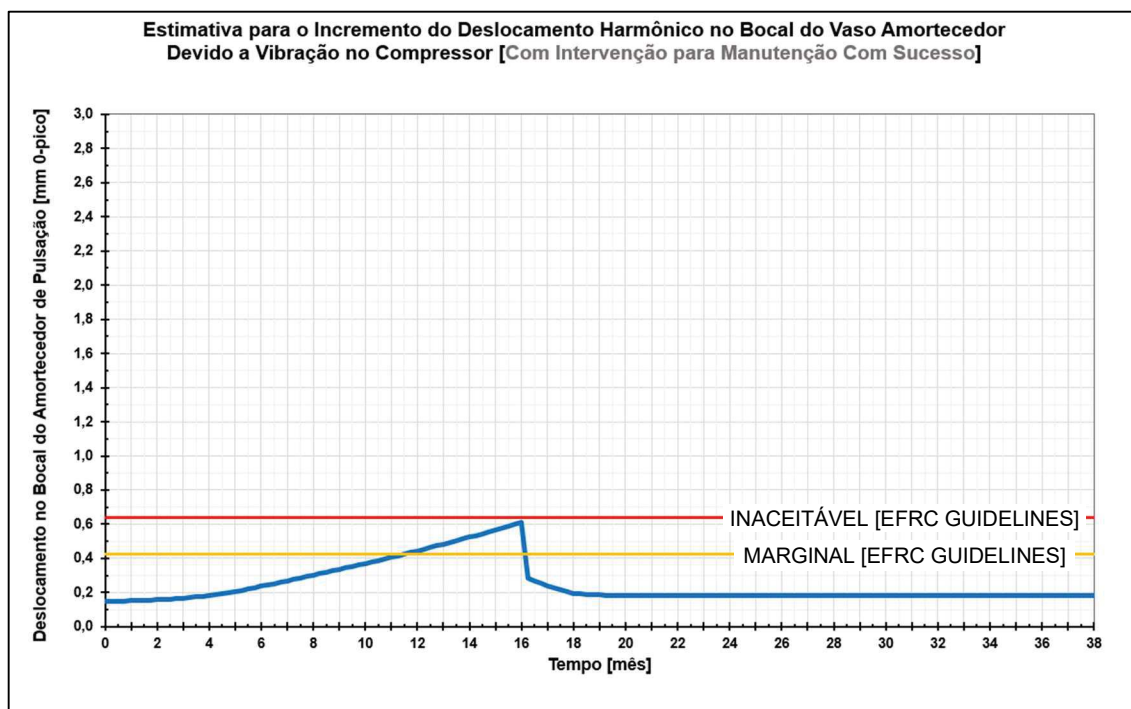


Figura 25 - Curva de Excitação do Vaso Amortecedor de Pulsação [Caso #2]. Intervenção bem-sucedida para manutenção do equipamento antes do nível de vibração no compressor exceder seu limite, conforme critério do EFRC.

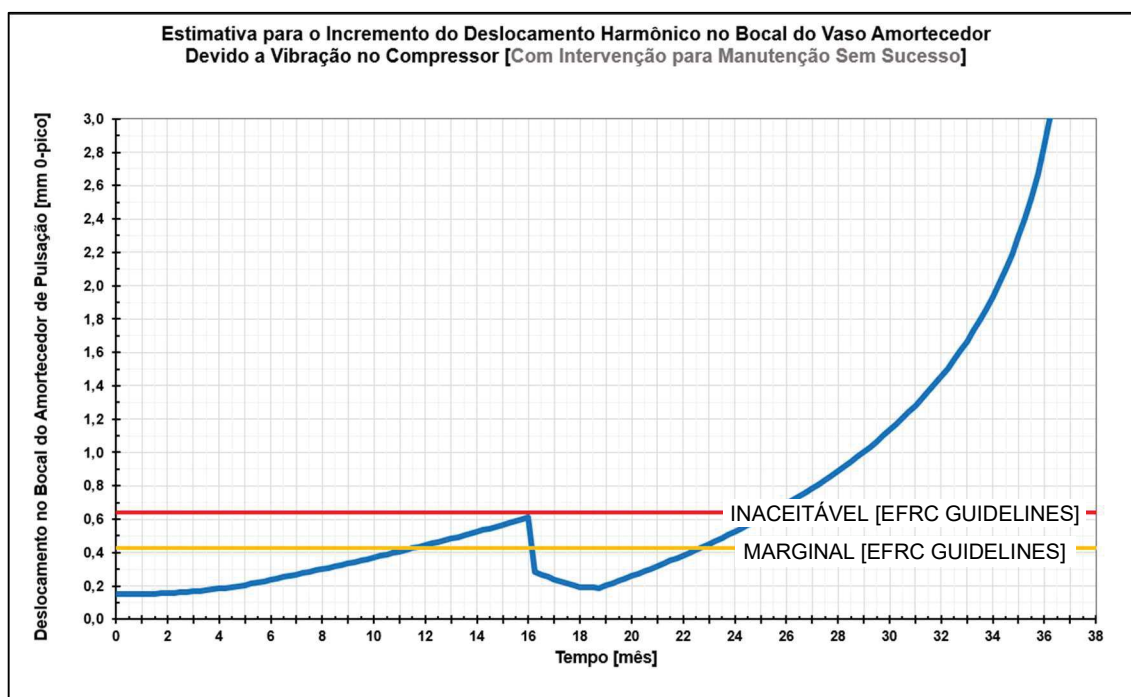


Figura 26 - Curva de Excitação do Vaso Amortecedor de Pulsação [Caso #3]. Intervenção malsucedida para manutenção do equipamento antes do nível de vibração no compressor exceder seu limite, conforme critério do EFRC.

Já os resultados obtidos pelo modelo computacional 3D (para o nó @100), a partir da excitação estimada, encontram-se dispostos, também de forma gráfica,

através da Figura 27, Figura 28 e Figura 29 – respectivamente, para as condições descritas no Caso #1, Caso #2 e Caso #3.

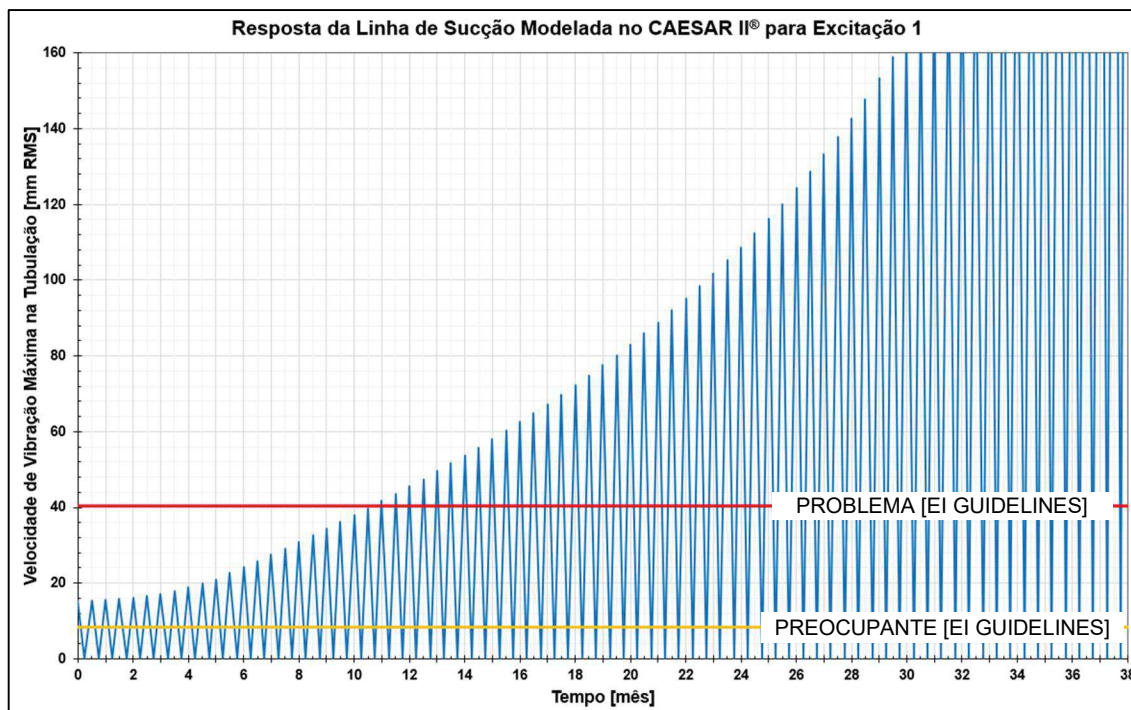


Figura 27 - Respostas de Vibração Obtidas para o Nó @100 da Tubulação [Caso #1]. Incrementos exponenciais para um modelo de falhas conforme a “Curva da Banheira”.

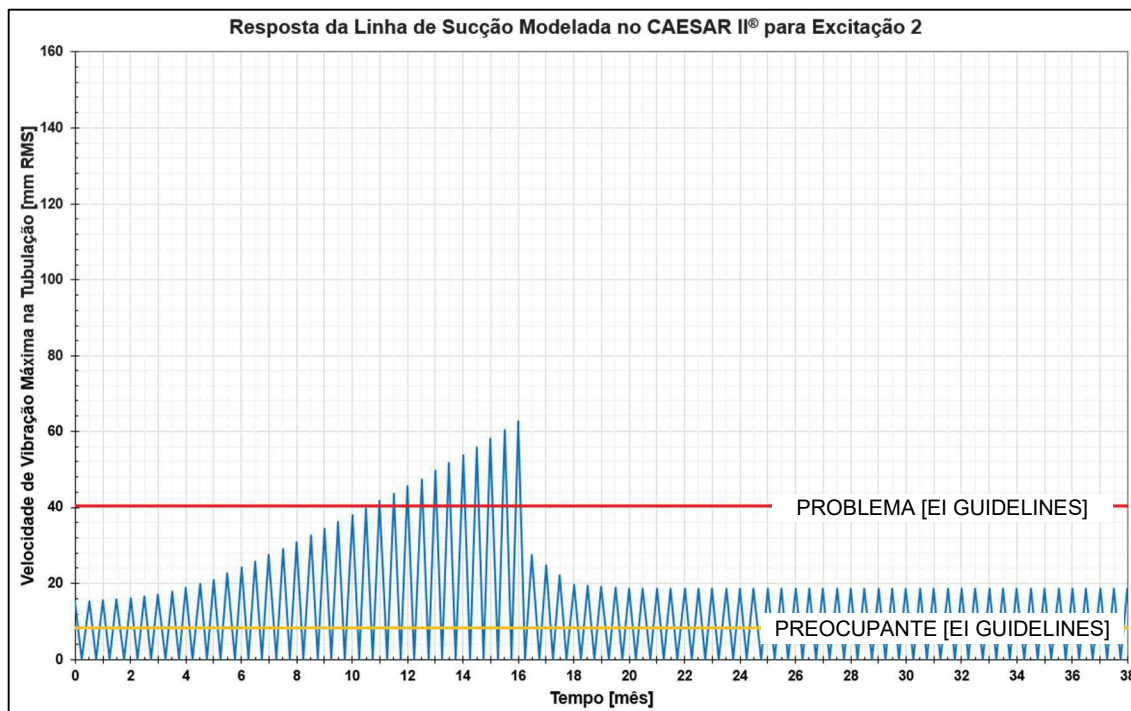


Figura 28 - Respostas de Vibração Obtidas para o Nó @100 da Tubulação [Caso #2]. Intervenção bem-sucedida para manutenção do equipamento antes da falha na tubulação.

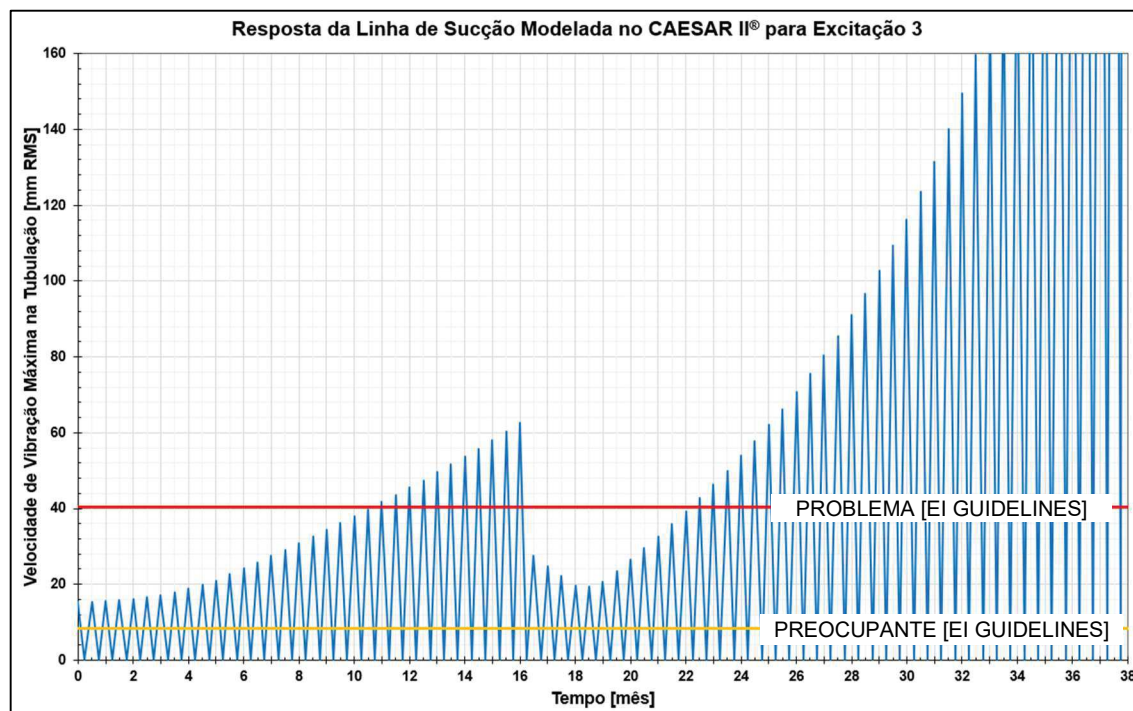


Figura 29 - Respostas de Vibração Obtidas para o Nó @100 da Tubulação [Caso #3]. Intervenção malsucedida para manutenção do equipamento antes da falha na tubulação.

A partir das velocidades de vibração da tubulação obtidas ($\dot{X}_{RMS}$), devidamente padronizadas, foi realizada a Análise Paraconsistente por meio dos algoritmos da rede proposta na Figura 22. Enquanto a velocidade de vibração da tubulação foi utilizada para valoração do Grau de Evidência Real favorável ($\mu_4 = \mu_{ER1'}$) no algoritmo do NAP₄, o LOF resultante para o sistema de tubulação foi utilizado como complementar para a valoração do Grau de Evidência Real desfavorável ($\lambda_4 = 1 - \mu_{ER}$), para o algoritmo do NAP citado. É importante lembrar que para a determinação do LOF, foi necessário mapear quais mecanismos de excitação estão presentes na tubulação em análise, além de informações de geometria e localização das linhas de derivação (especialmente, das derivações do tipo TPD). Somente após este mapeamento, conforme metodologia apresentada no EI Guidelines, foi possível tabular ou calcular os valores dos LOF's para alimentar a primeira camada da Rede de Análise Paraconsistente (NAP₁ e NAP₂).

Os resultados obtidos para o Grau de Certeza Real Resultante, através da RAP proposta na Figura 22, encontram disponibilizados nos gráficos da Figura 30, Figura 31 e Figura 32 – respectivamente para o Caso #1, Caso #2 e Caso #3.

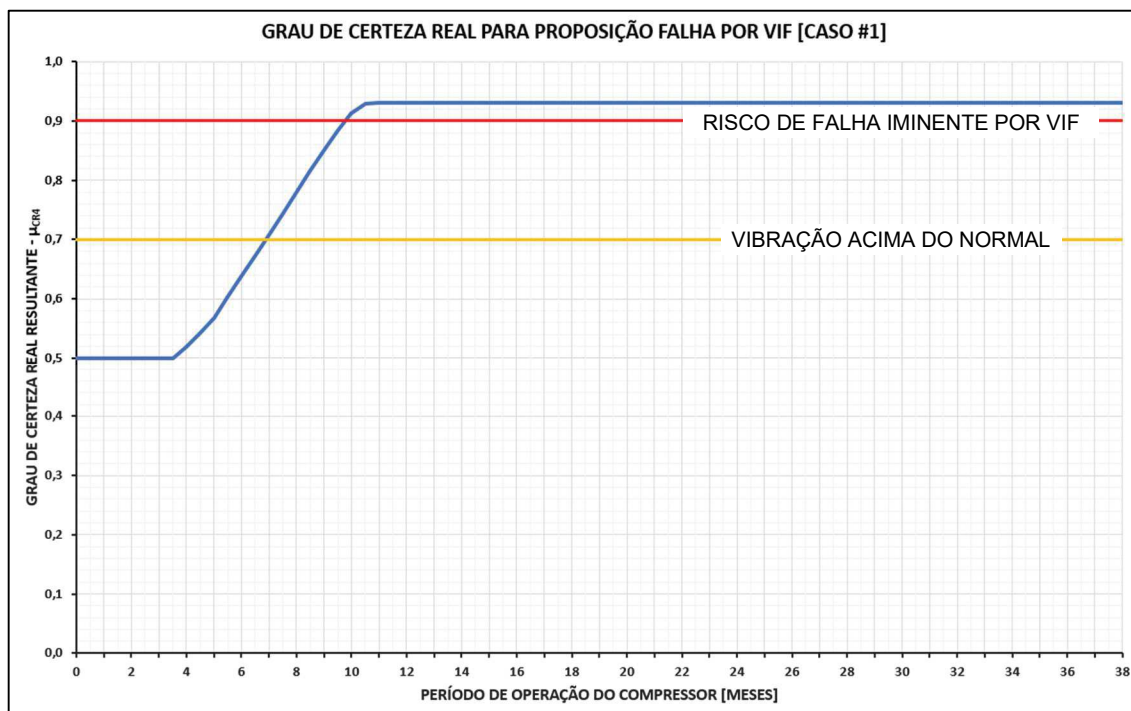


Figura 30 - Resultados para Grau de Certeza Real resultante para o Caso #1. Para Risco de Falha por VIF, $\mu_{ER4} = 0,9$; Para Velocidade de Vibração acima do Normal, $\mu_{ER4} \geq 0,7$.

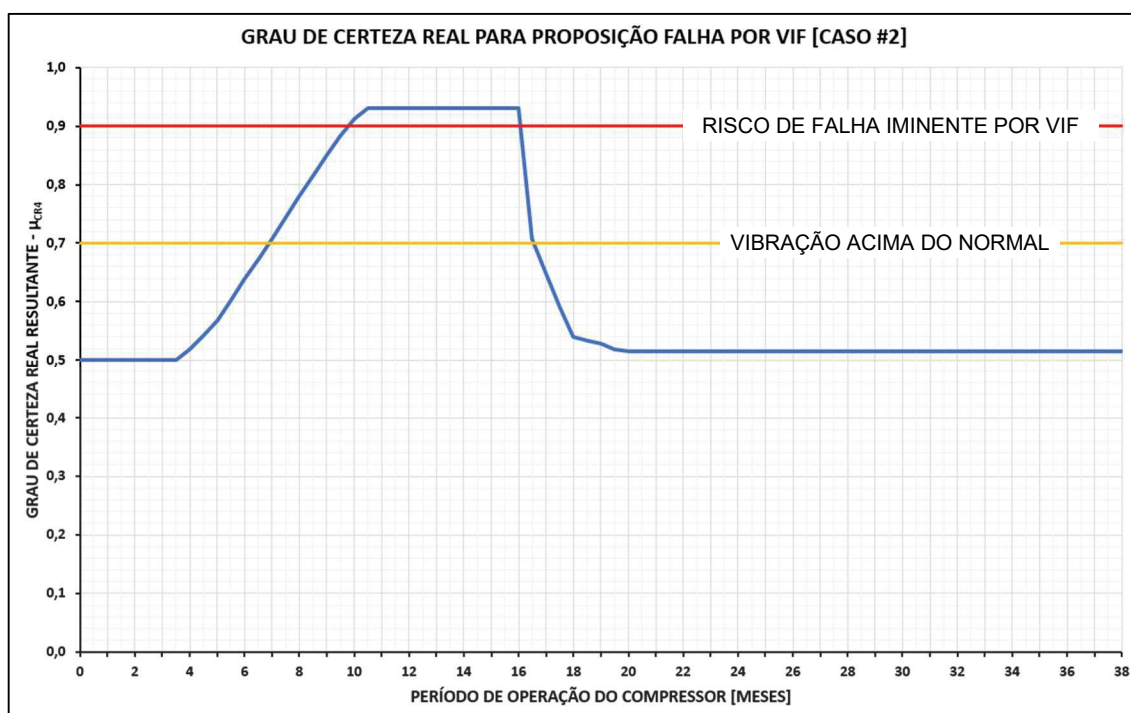


Figura 31 - Respostas para Grau de Certeza Real resultante para o Caso #2. Para Risco de Falha por VIF, $\mu_{ER4} = 0,9$; Para Velocidade de Vibração acima do Normal, $\mu_{ER4} \geq 0,7$.

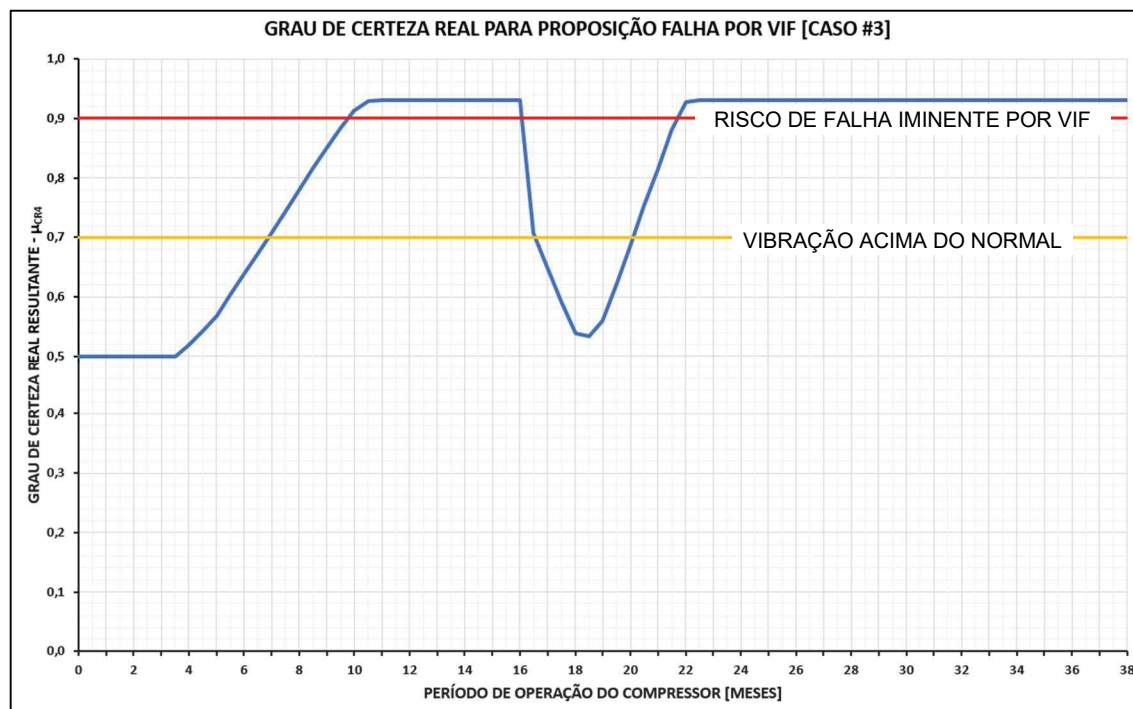


Figura 32 - Respostas para Grau de Certeza Real resultante para o Caso #3. Para Risco de Falha por VIF, $\mu_{ER4} = 0,9$; Para Velocidade de Vibração acima do Normal, $\mu_{ER4} \geq 0,7$.

A partir dos valores obtidos para a RAP (ilustrada na Figura 22), para cada três medições consecutivas, foram calculados o Grau de Evidência de Risco Resultante ($\mu_{ERrisco}$) e o Grau de Tendência de Risco (μ_{tend}), a partir do Algoritmo Analisador de Tendência de Risco do NAP₅ (ilustrado na Figura 14).

Uma vez determinado em qual(is) período(s) de operação do compressor, o risco de falha por VIF era crescente, foi feita uma linearização para os valores de $\mu_{ERrisco}$ correspondentes e determinado, por extrapolação, quando ocorreria a falha (ou seja, quando $\mu_{ERrisco} = 0,9$). O resultado para esta predição de falha foi disponibilizado, de forma gráfica, com o total de dias remanescentes para o evento e com o cálculo do mês em que ocorreria a falha. Este procedimento foi realizado para as três condições de operação – Caso #1, Caso #2 e Caso #3. E todos os resultados obtidos encontram-se ilustrados nos gráficos a seguir:

- Caso #1 – Consultar: Figura 33, Figura 34, Figura 35 e Figura 36;
- Caso #2 – Consultar: Figura 37, Figura 38, Figura 39 e Figura 40;
- Caso #3 – Consultar: Figura 41, Figura 42, Figura 43 e Figura 44.

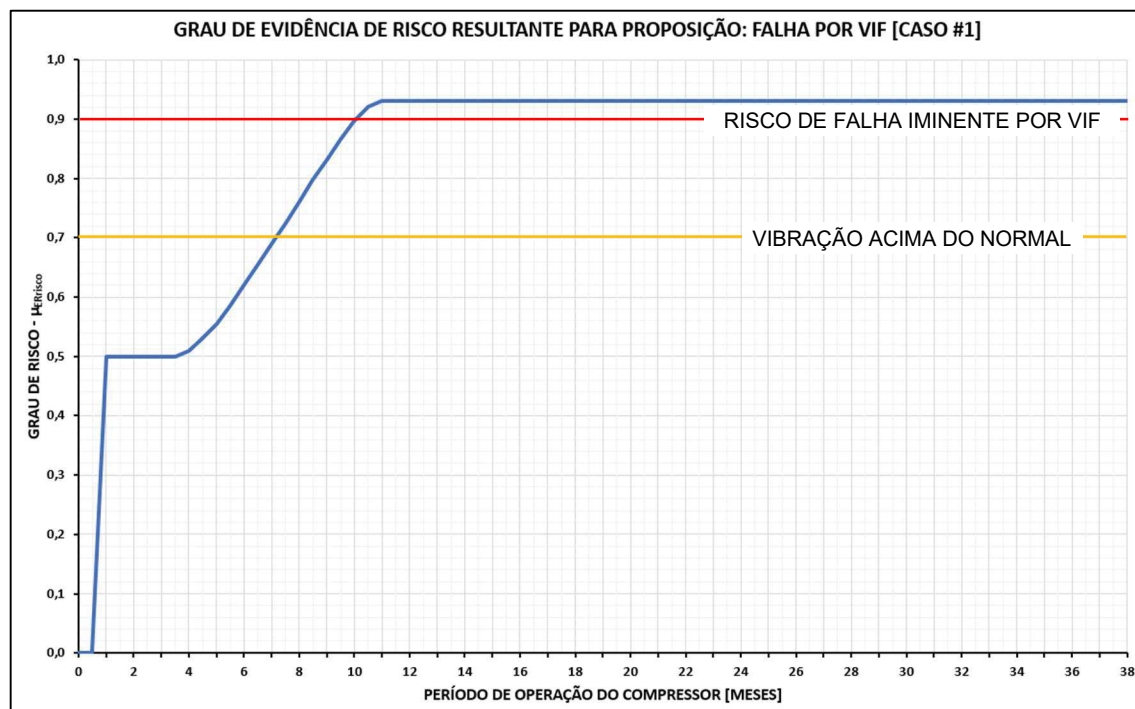


Figura 33 - Grau de Evidência de Risco Resultante para o Caso #1.

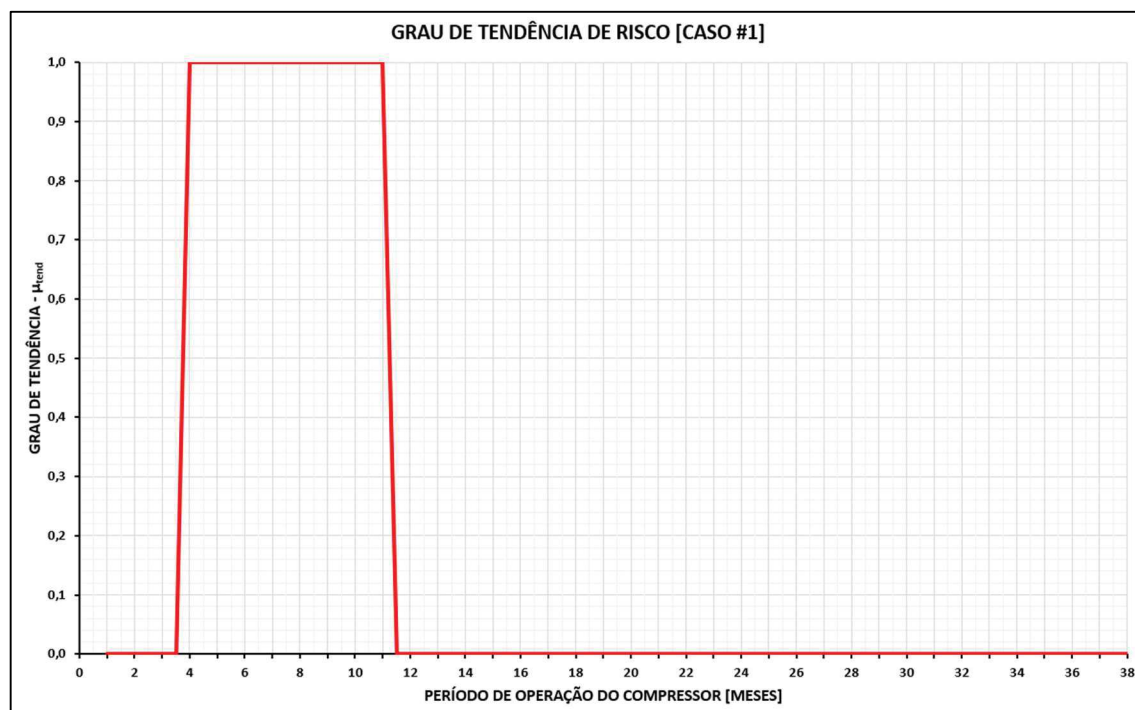


Figura 34 - Grau de Tendência de Risco para o Caso #1.

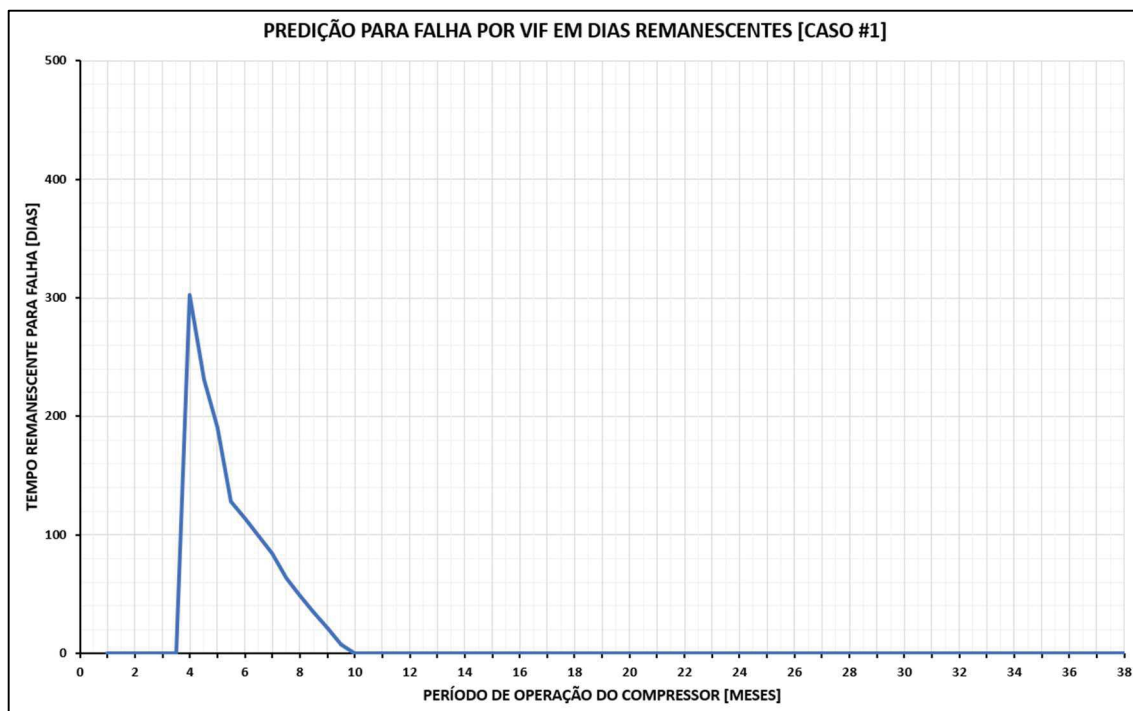


Figura 35 - Predição de Falha em Dias Remanescentes para o Caso #1.

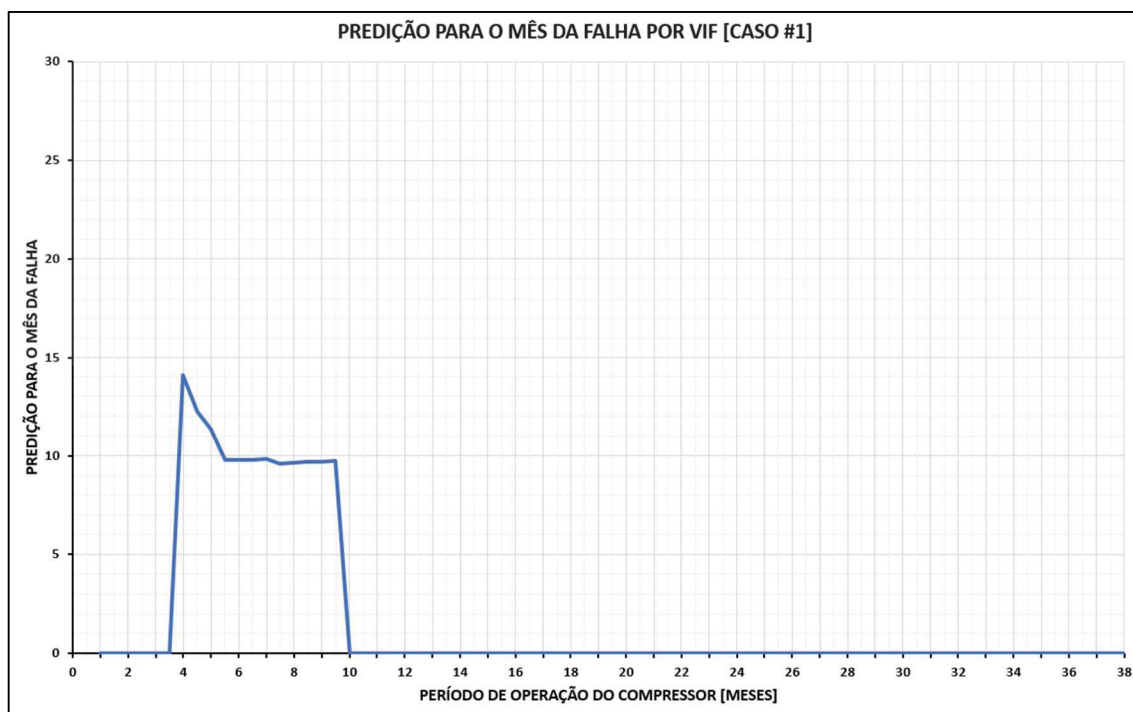


Figura 36 - Predição para o Mês em que Ocorrerá a Falha para o Caso #1.

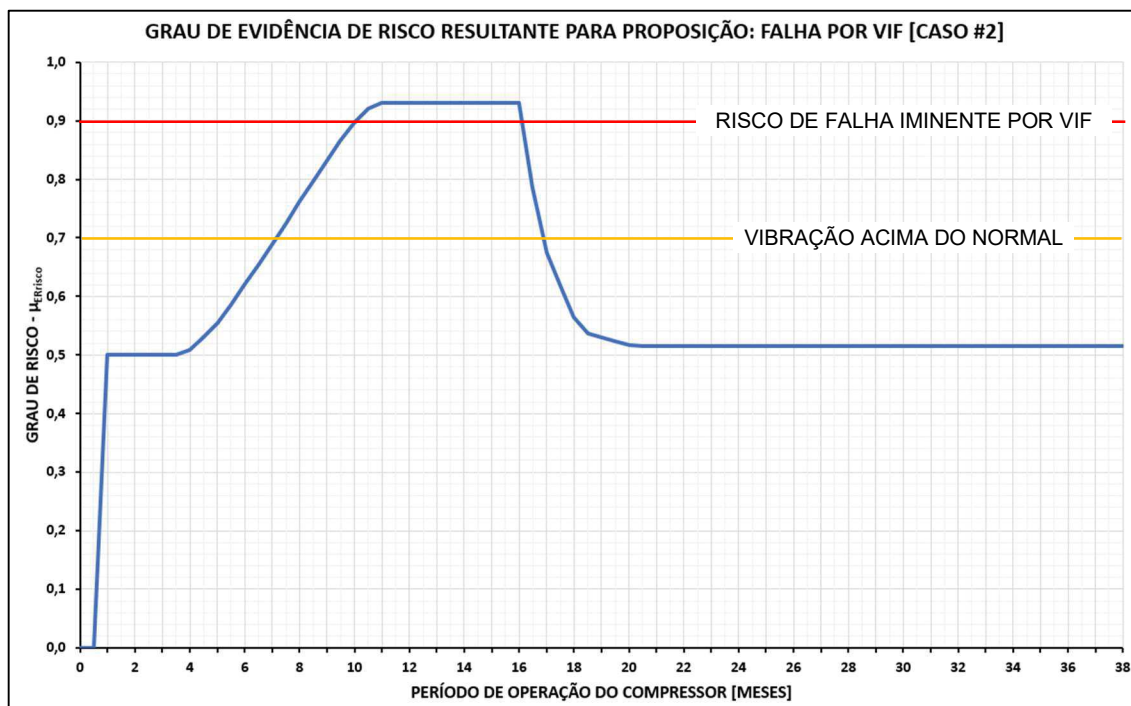


Figura 37 - Grau de Evidência de Risco Resultante para o Caso #2.

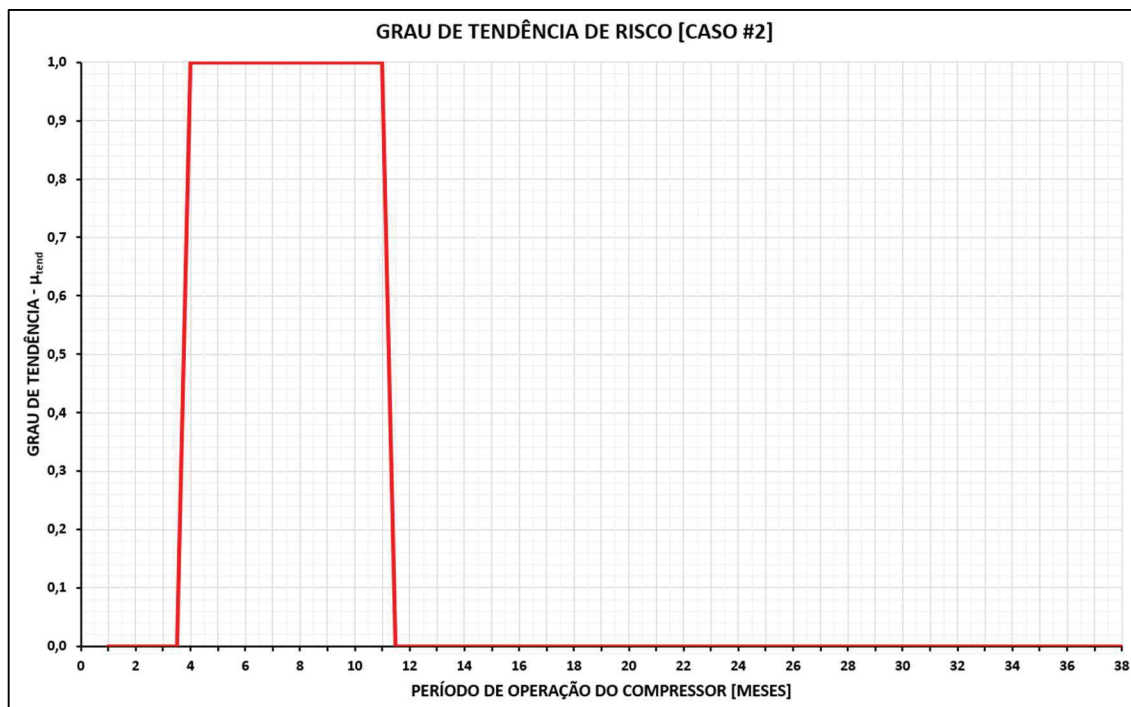


Figura 38 - Grau de Tendência de Risco para o Caso #2.

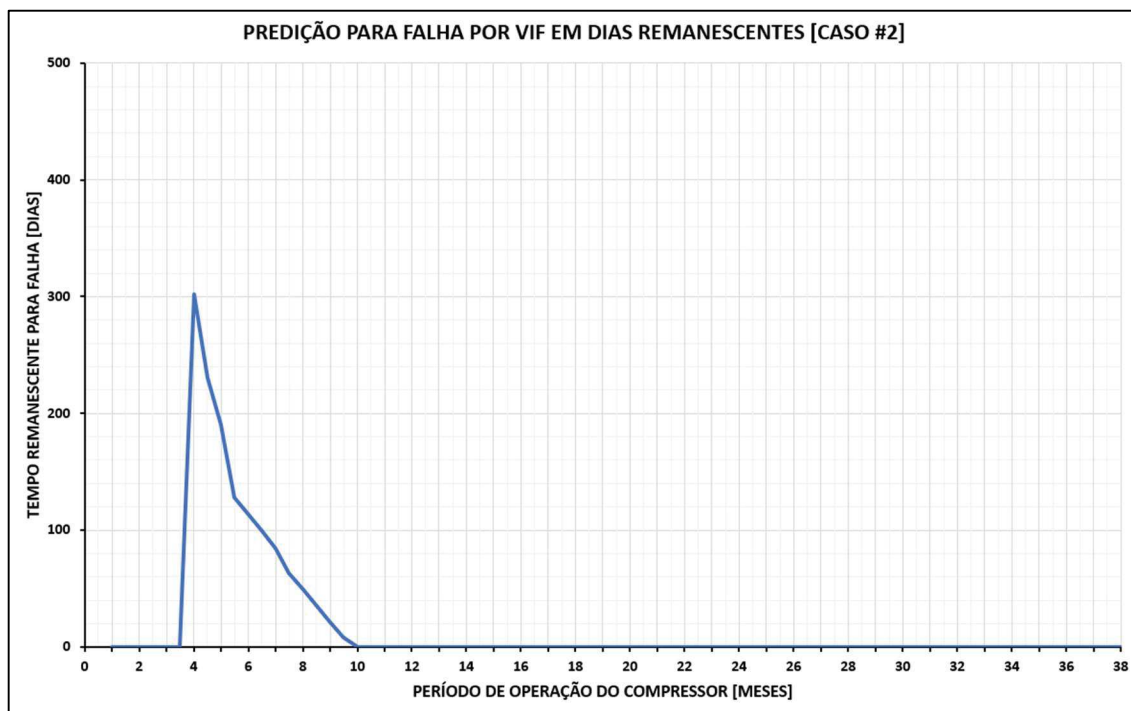


Figura 39 - Predição de Falha em Dias Remanescentes para o Caso #2.

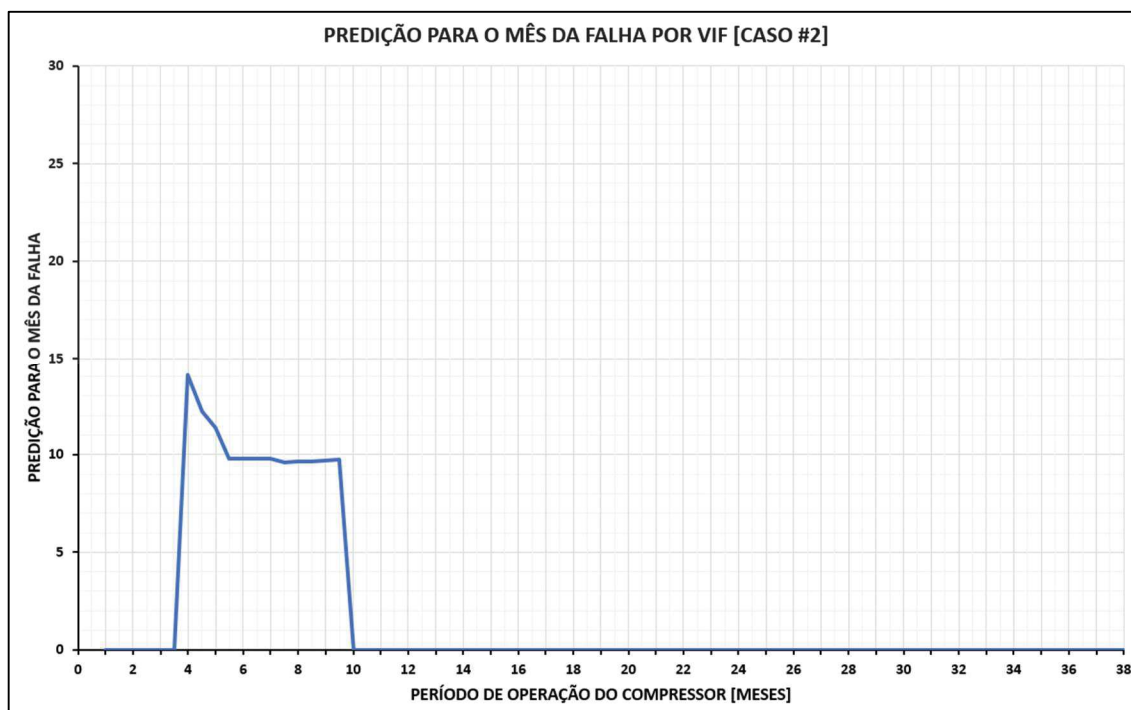


Figura 40 - Predição para o Mês em que Ocorrerá a Falha para o Caso #2.

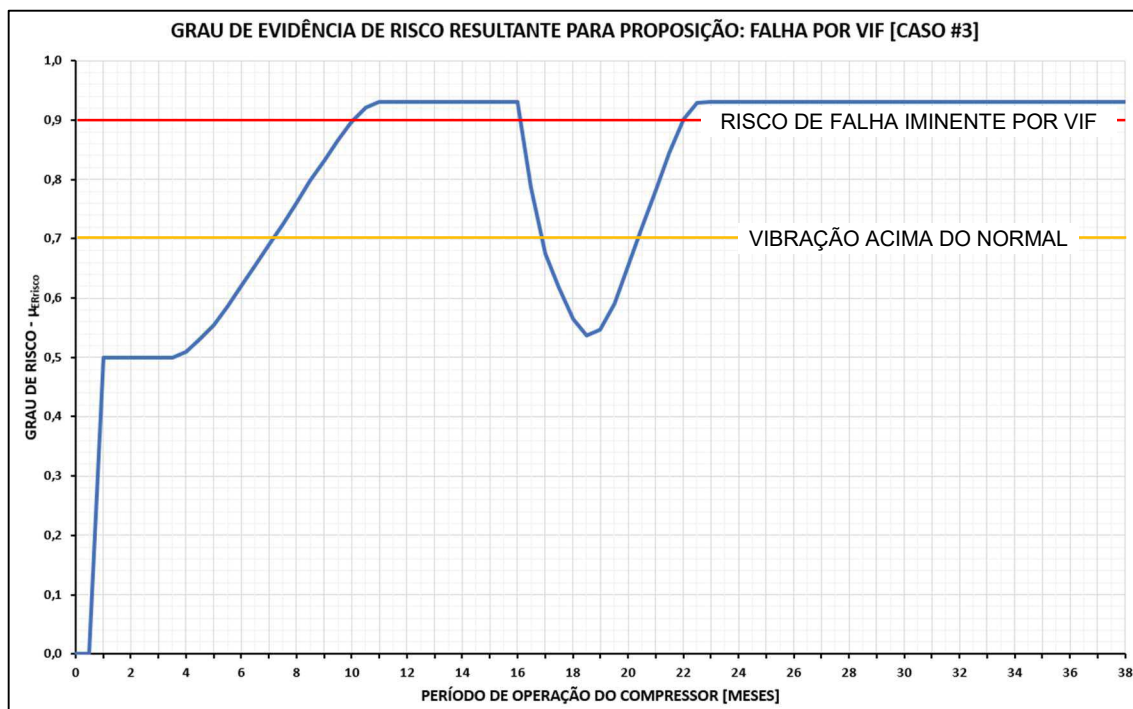


Figura 41 - Grau de Evidência de Risco Resultante para o Caso #3.

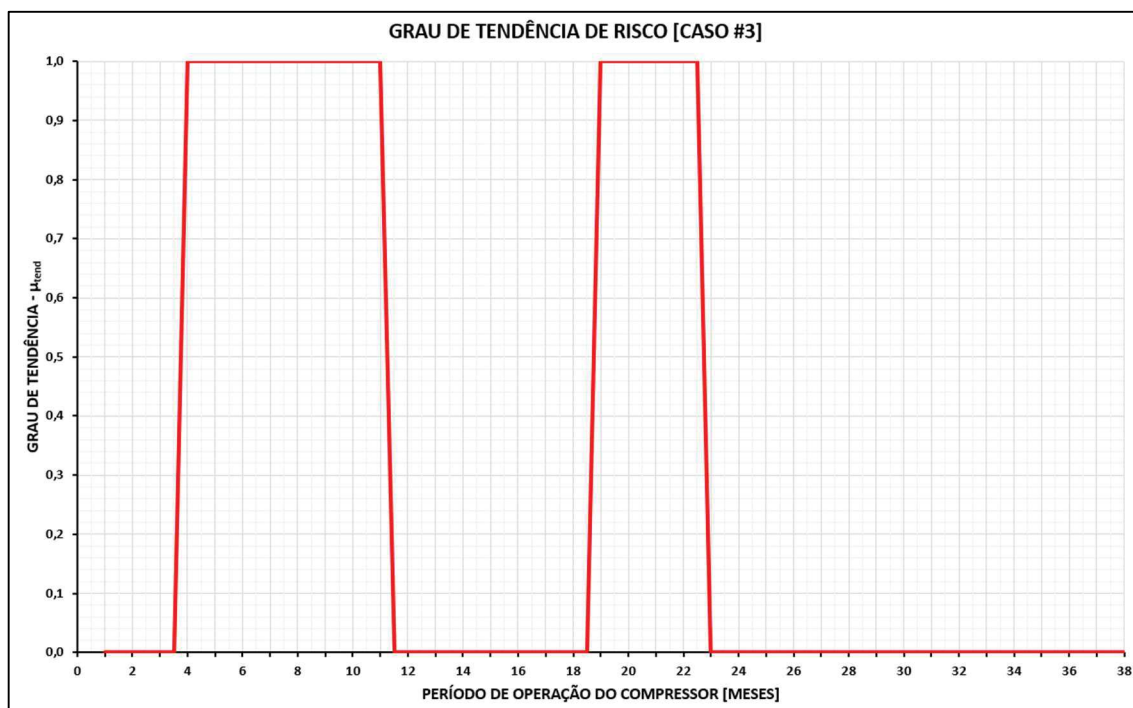


Figura 42 - Grau de Tendência de Risco para o Caso #3.

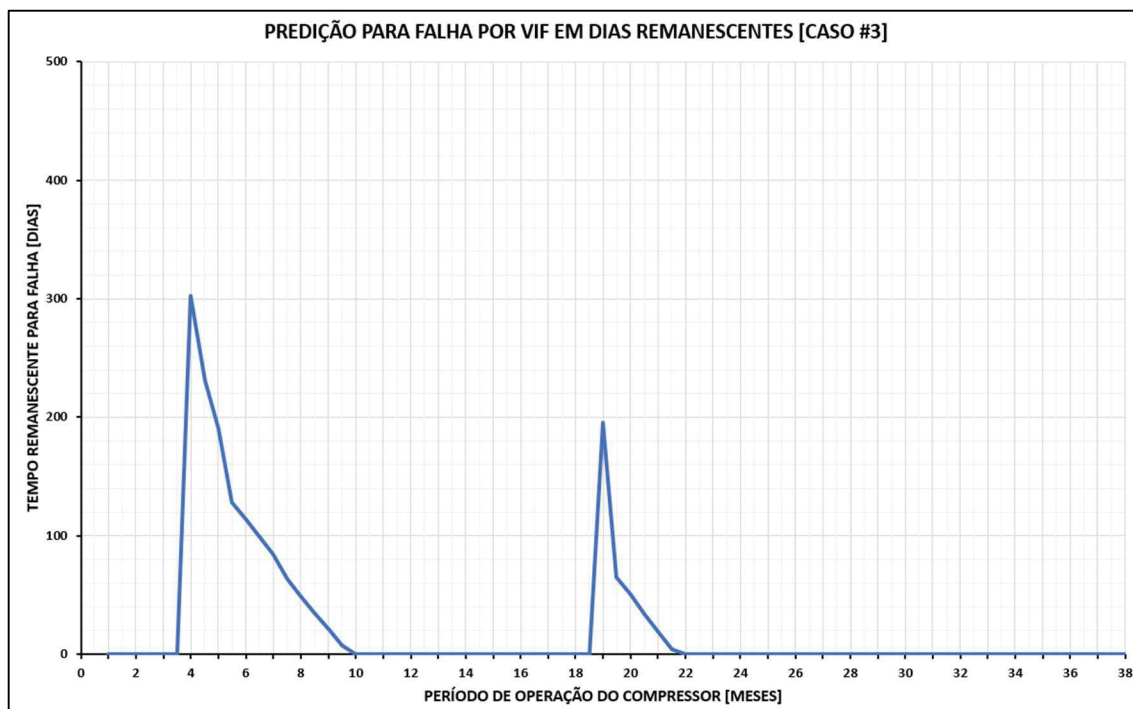


Figura 43 - Predição de Falha em Dias Remanescentes para o Caso #3.

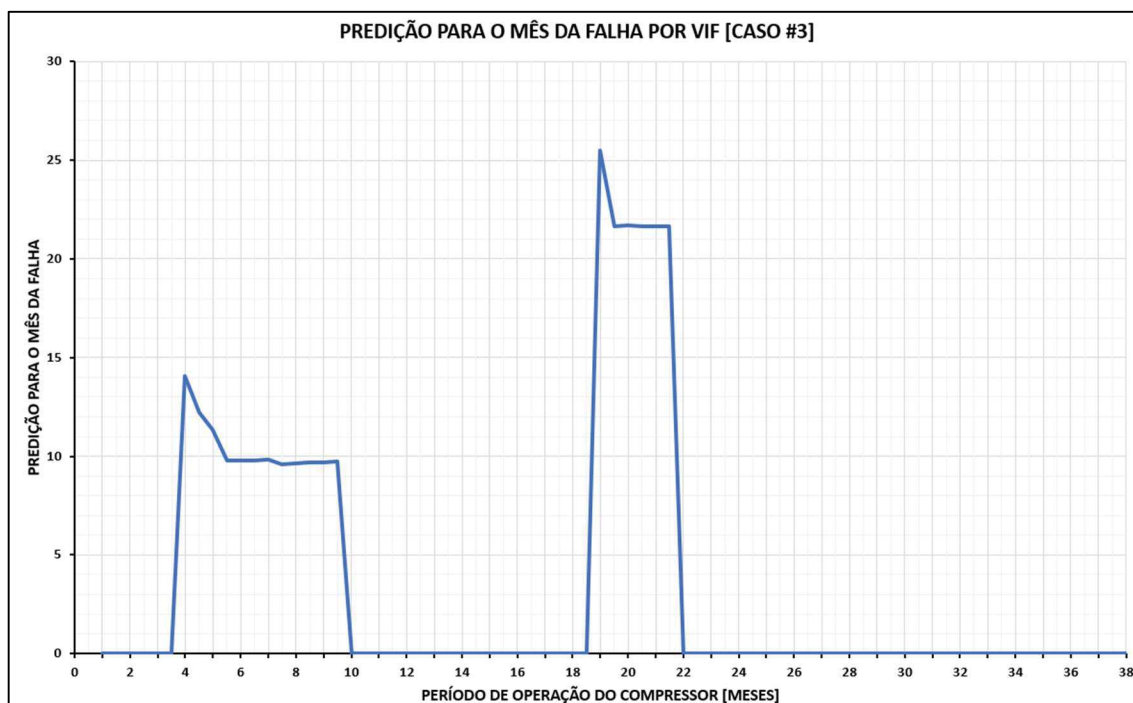


Figura 44 - Predição para o Mês em que Ocorrerá a Falha para o Caso #3.

Após os resultados obtidos com a LPA2v (ilustrados acima), percebeu-se que para os três primeiros cenários propostos (Caso #1, Caso #2 e Caso #3), uma vez que foi utilizado o mesmo incremento na taxa de vibração para curvas de excitação adotadas (ilustrados na Figura 24, Figura 25 e Figura 26), chegou-se as mesmas velocidades de vibração e a predição obtida para o mês de falha foi igual em todos os casos (Figura 36, Figura 40 e Figura 44). Assim, percebeu-se a necessidade de se utilizar curvas de excitação, com diferentes incrementos para taxa de vibração e, conseqüentemente, diferentes velocidades de vibração. E como a predição prematura para o mês de falha indicou o uso de um nível de vibração de severa intensidade, optou-se por curvas de excitação com menores incremento na taxa de vibração, capazes de produzir um menor nível de vibração na tubulação.

Assim, decidiu-se por recalcular o Caso #1 pela mesma Rede de Análise Paraconsistente, no entanto, dividindo-se os valores originais da velocidade de vibração ($\dot{X}_{RMS}$), inicialmente, por 2 (dois) e, posteriormente, por 4 (quatro). Isto porque, velocidades de vibração menores indicam menores níveis de excitação no sistema de tubulações. Desta forma, foram criados dois cenários de estudos adicionais, denominados de Caso 50% e Caso 25%, respectivamente.

O primeiro novo cenário representou uma condição operacional hipotética onde a taxa de incremento na velocidade de vibração da tubulação era igual a metade (50%) do Caso #1, conforme ilustrado na Figura 45. Já no cenário seguinte, utilizou-se uma taxa de incremento na velocidade igual a um quarto (25%) da utilizada, originalmente, para o Caso #1, conforme Figura 46. Conforme RAP representada na Figura 22, a velocidade de vibração da tubulação (no nó @100), é utilizada para valoração do Grau de Evidência favorável μ_4 no algoritmo do NAP4.

Obtidos o Grau de Evidência de Risco Resultante ($\mu_{ERRisco}$) e o Grau de Tendência de Risco (μ_{tend}), para estas duas novas condições operacionais, foram calculadas a predição para o mês da falha por VIF. Os resultados encontrados encontram-se ilustrados na Figura 47 e Figura 48, respectivamente, para o Caso 50% e para o Caso 25%.

Conforme esperado, as novas curvas de predição para o mês de falha deslocaram-se para direita, ou seja, houve um aumento do tempo para falha por VIF, a partir do mês inicial (mês “zero”), uma vez que se utilizou níveis de vibração

de menor severidade nestes novos dois cenários. Também foi possível identificar um certo padrão para a curva de predição do mês de falha.

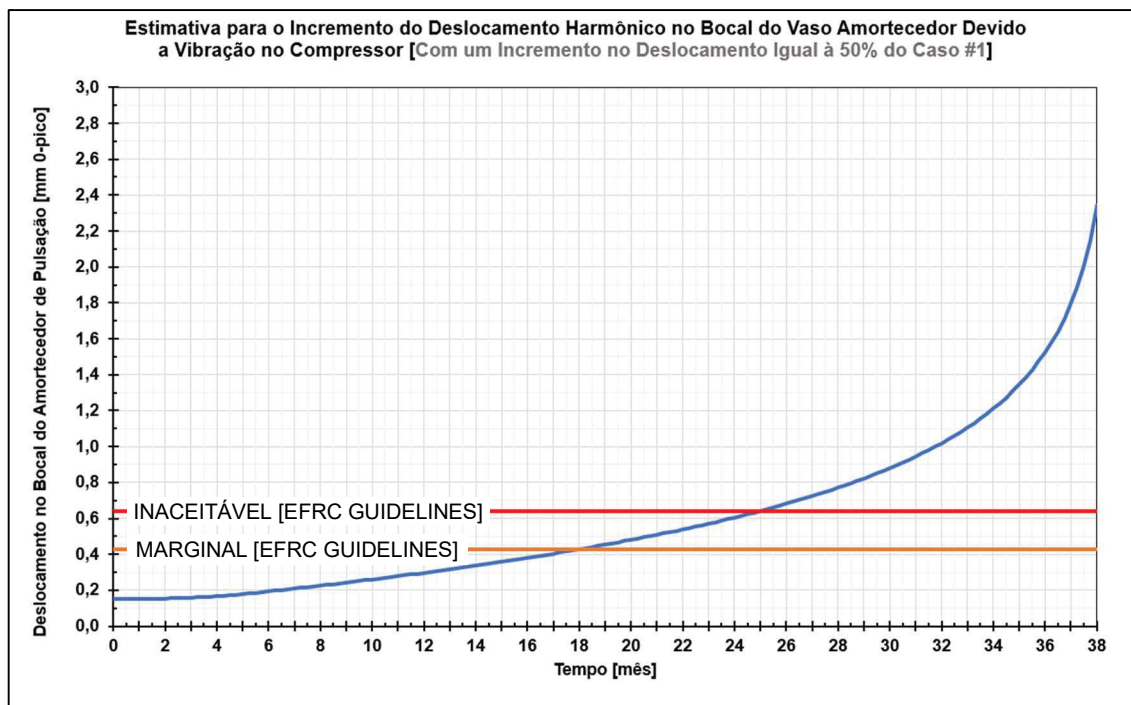


Figura 45 - Curva de Excitação do Vaso Amortecedor de Pulsação [Caso 50%].

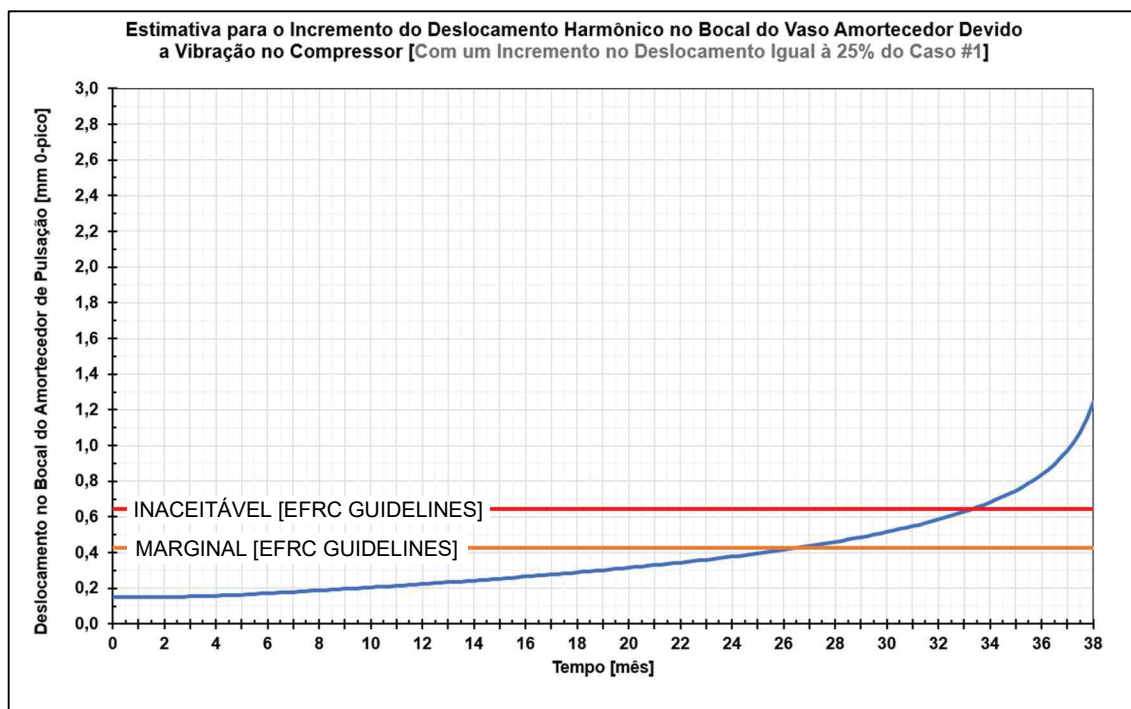


Figura 46 - Curva de Excitação do Vaso Amortecedor de Pulsação [Caso 25%].

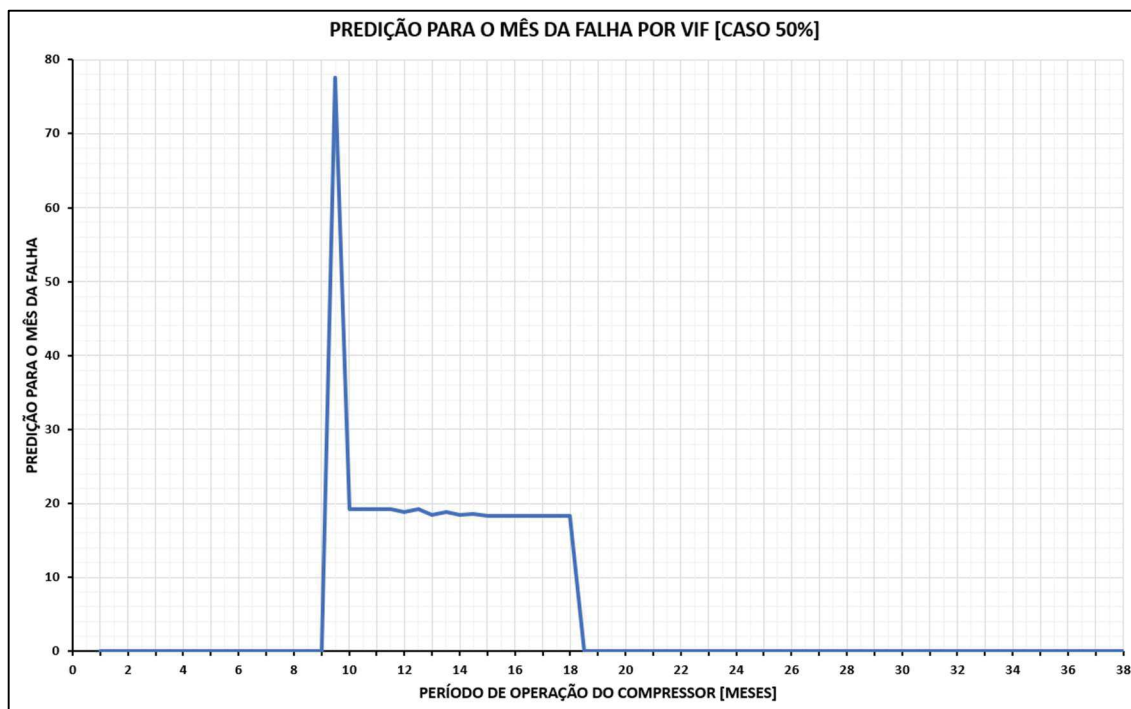


Figura 47 - Predição para o Mês em que Ocorrerá a Falha para o Caso 50%.



Figura 48 - Predição para o Mês em que Ocorrerá a Falha para o Caso 25%.

3.2. Discussão

Com base nos resultados obtidos (ainda na simulação computacional 3D), é possível constatar que, mesmo quando o compressor alternativo operava em um nível de vibração considerado normal para o equipamento (conforme ilustrado na Figura 24, Figura 25 e Figura 26), a resposta de vibração no sistema de tubulação já se encontrava em um nível de excitação acima daquele considerado normal pelo método do EI Guidelines (conforme Figura 27, Figura 28 e Figura 29).

Por exemplo, no instante inicial $t_0 = 0$, o deslocamento no bocal de descarga do vaso absorvedor de pulsação, X_{0-pico} , era de cerca de 0,2 mm, conforme Figura 24, Figura 25 e Figura 26 (sendo que o primeiro “alarme” só ocorre em $X_{0-pico(marginal)} = 0,427$ mm). No entanto, neste mesmo instante inicial ($t_0 = 0$), a curva do sistema de tubulação correspondente ao nó @100 (ilustrada na Figura 19 e/ou na Figura 21), já se encontrava com uma velocidade de vibração $\dot{X}_{RMS} = 15,327$ mm/s, conforme Figura 27, Figura 28 e Figura 29 (sendo que o primeiro “alarme” ocorre em $\dot{X}_{RMS(concern)} = 8,32$ mm/s). Ou seja, a velocidade de vibração na tubulação já se encontrava acima da linha Preocupante ou *Concern* estabelecida pela diretriz do Energy Institute – conforme limites ilustrados na Figura 5.

É importante ressaltar que este modelo computacional 3D foi calibrado a partir de valores obtidos, experimentalmente, para as frequências naturais reais da linha de sucção do segundo estágio do compressor. E que tal tubulação apresentou falha por VIF, em tomada de instrumento (TPD), quando o compressor operava dentro de um nível de vibração aceitável.

O fato de se identificar uma resposta de vibração excessiva, quando a fonte de excitação (vibração do compressor), se encontrava abaixo do limite permitido para o equipamento, indica que este sistema de tubulação foi concebido com uma rigidez inadequada para o nível de carregamento dinâmico que lhe era imposto, ou seja, o sistema de tubulação tinha baixa rigidez, o que pode ser caracterizado como uma falha de projeto.

Este tipo de problema tem ocorrido em instalações de processo devido a falhas recorrentes em projetos que concebem, inadvertidamente, sistemas de tubulações de baixa rigidez – seja pelo (a) uso de ferramentas computacionais com

cálculos mais precisos, ou pelo (b) uso de novos materiais de maior resistência mecânica. No caso específico de projetos de sistemas de tubulações, onde não é muito usual considerar os carregamentos dinâmicos (ou considerá-los de forma inadequada devido à complexidade), linhas com baixa rigidez tenderão a vibrarem com mais facilidade (principalmente, quando a suportação das linhas não considerou os carregamentos dinâmicos atuantes). Por outro lado, tubos com paredes de menor espessura, uma vez que possuem áreas menores para suportarem as solicitações mecânicas, apresentarão níveis de tensões mais elevados nas derivações TPD. Assim, havendo vibrações excessivas, poderão surgir condições operacionais desconfortáveis e preocupantes (com presença de ruídos e deslocamentos nas linhas), capazes de culminar em falhas por VIF, com perda de contenção e consequente vazamento de hidrocarbonetos [MEDEIROS, MENDONÇA e TINOCO, 2020, p. 1].

Uma outra consideração importante, diz respeito às estratégias de inspeção de tubulação, usualmente, praticadas em instalações de processos. Uma vez que a corrosão é o principal mecanismo de dano em tubulações de processos, os planos de inspeção e de manutenção preditivas para estes equipamentos, geralmente, se limitam a monitorar, apenas, a perda da espessura de parede de tubos e conexões. No entanto, o avanço da indústria de petróleo para águas cada vez mais profundas e ultra profundas (como é o caso do pré-sal brasileiro), tem exigido instalações que operem interligadas à compressores de maior porte e com pressões mais elevadas. Como consequência, o mecanismo de dano relacionado a falha por VIF em tubulações tem se tornado cada vez mais relevante em instalações *offshore*, merecendo mais atenção por parte dos planos de integridades. Conforme já mencionado, 21% dos eventos de perda de contenção e vazamentos de hidrocarbonetos no Mar do Norte, ocorrem em tubulações devido a falha por VIF [HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, 2008, p. 28; GHAZALI; HEE; LONG, 2014, p. 350; KEPRATE; RATNAYAKE, 2018, p. 1].

Para os resultados obtidos para o Grau de Certeza Real Resultante, ilustrados nos gráficos da Figura 30, Figura 31 e Figura 32, é possível observar que, referente aos valores das primeiras velocidades de vibração, obteve-se $\mu_{CR4} = 0,5$, o que indica uma condição de indefinição em relação a proposição em questão, típica em situações onde não existe uma afirmação ou refutação da proposição que

está sendo analisada pela RAP proposta. Esta condição de indefinição indica um $G_{CR} = 0$, devido a presença de uma alta contradição ou, ainda, falta de evidências nos dados utilizados como fontes de informação [DA SILVA FILHO; ABE; TORRES, 2008, p. 71-72].

Provavelmente, o que deve ter ocorrido acima foi uma condição de alta contradição entre as fontes de informação, pois para os primeiros meses de operação, as curvas de excitação do compressor consideravam baixos níveis de vibração, ao passo que o LOF sugeria uma elevada predisposição da linha falhar por VIF.

Depois desse período de indefinição, μ_{CR} cresce, tendendo a 1 (um). Esta nova condição indica um estado lógico *Verdadeiro* à proposição adotada. Também foi possível observar que o Grau de Certeza Real Resultante alcançou seu valor máximo em $\mu_{CR4} = 0,931$. Como a tubulação em análise apresentou falha real, quando em operação, tem-se que o nível de vibração alcançado estaria acima de valores admissíveis. Arbitrou-se, portanto, um $\mu_{CR4(máximo)} = 0,9$ e um alarme $\mu_{CR4(alarme)} = 0,7$. Assim, delimitou-se um intervalo de interesse para predição da proposição P_4 : existe “*Risco de Falha Iminente por VIF*”. Ou seja, operar com o Grau de Certeza Real acima de 0,7 já significaria operar com a planta em uma condição de risco – demandando ações mitigatórias por parte dos especialistas. E caso o nível de vibração venha atingir o limite máximo ($\mu_{ER4(máximo)} = 0,9$), a planta de compressão deverá ser tirada de operação (condição de *shutdown*).

Com relação ao Grau de Evidência de Risco Resultante ($\mu_{ERrisco}$), o mesmo apresentou comportamento similar ao Grau de Certeza Real (μ_{CR4}) – conforme Figura 33, Figura 37 e Figura 41. E, portanto, adotou-se os mesmos limites para “*alarme*” e “*valor máximo admissível*” (respectivamente: 0,7 e 0,9).

Através do Grau de Tendência de Risco (Figura 34, Figura 38 e Figura 42), chegou-se a predição da falha, inicialmente, em dias remanescentes até o evento (Figura 35, Figura 39 e Figura 43), e em seguida, foi possível uma predição para o mês esperado para que a falha ocorresse (Figura 36, Figura 40 e Figura 44). Para os três casos analisados (conforme mencionado), esta predição indicou uma falha por volta do décimo mês de operação, já que a taxa de incremento da velocidade de vibração utilizada foi igual em todos os casos – ver ainda Figura 49. E, de acordo com a Figura 27, Figura 28 e Figura 29, este seria o mês para o qual a velocidade

de vibração alcançaria o limite máximo admissível pelo critério do Energy Institute, ou seja, condição de falha por VIF iminente.

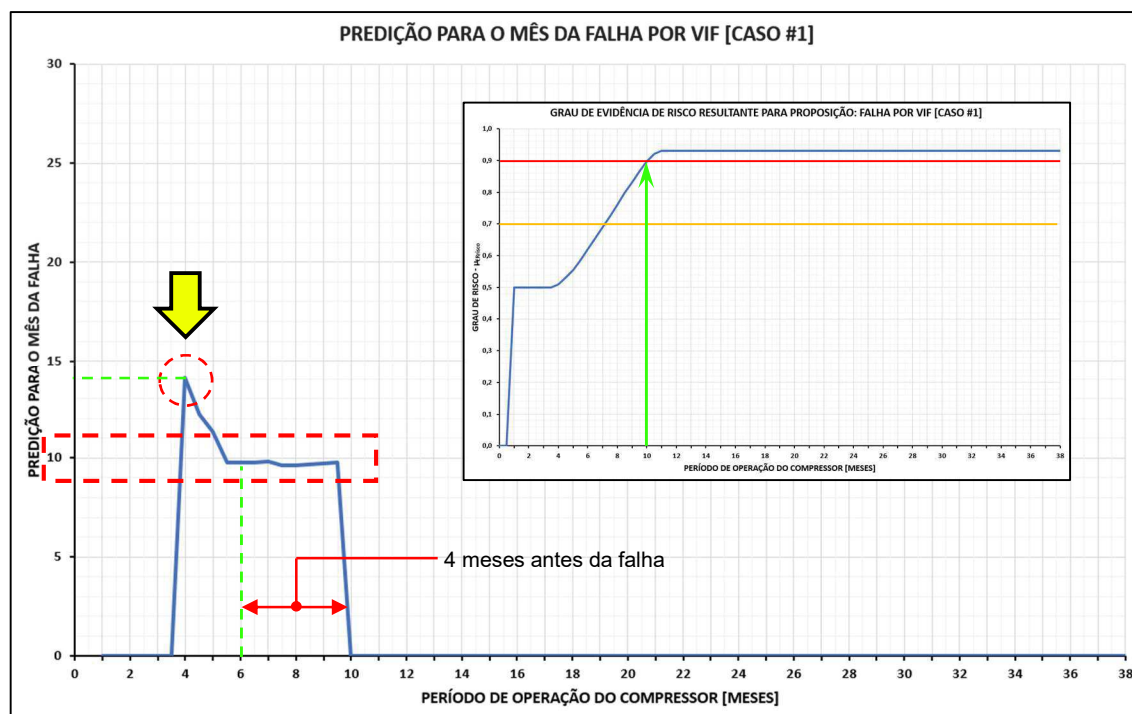


Figura 49 - Interpretação dos Resultados para Predição da Falha por VIF.

É interessante observar que esta informação foi sinalizada com 4 (quatro) meses de antecedência em relação ao evento, conforme Figura 49. No entanto, com 6 (seis) meses de antecedência já se tinha uma indicação de que o sistema de tubulação necessitaria de uma parada para manutenção antes do término do tempo de campanha operacional (ver seta amarela na Figura 49, sinalizando falha por VIF, no eixo vertical, para o 14º mês antes da convergência da predição em valores inferiores). Conforme já foi citado, uma campanha operacional de uma unidade de produção de petróleo *offshore* costuma ser de 36 (trinta e seis) meses de operação, quando então, ocorre a parada de manutenção programada da unidade, para manutenção preventiva e inspeções normativas.

É importante destacar que, para a taxa de incremento utilizada para excitação do sistema de tubulação, na simulação computacional 3D (para o Caso #1, Caso #2 e Caso #3), a tubulação teve um tempo de operação três vezes menor do que o tempo de campanha operacional convencional – ou seja, foi utilizado uma taxa relativamente severa para o incremento na velocidade de vibração.

Duas novas predições encontram-se ilustradas na Figura 47 e na Figura 48. Nestes casos, as predições foram feitas para níveis de vibração de menor severidade (com incrementos iguais à 50% e 25%, respectivamente, aos valores utilizados na curva de excitação do Caso #1). Para estes novos cenários de operação, a predição ocorreu com cerca 8 (oito) e 10 (dez) meses de antecedência, respectivamente.

Comparando-se as predições dos três primeiros casos (Figura 36, Figura 40 e Figura 44), com estes dois últimos (Figura 47 e Figura 48), conforme se observou, os resultados indicaram que, para curvas de excitação de menor severidade, a curva de predição do mês da falha se deslocou para a direita (o que já era esperado). E para níveis de vibração de maior severidade, o tempo transcorrido entre o momento da predição da falha e seu potencial evento será menor, ou seja, haverá um menor período disponível para o planejamento da intervenção de reparo na planta.

Por fim, ressalta-se a importância na predição de um *potencial modo de falha*, como é o caso da falha por VIF. Este tipo de informação é muito relevante às equipes de operação e manutenção, uma vez que permite a antecipação de ações relacionadas à manutenção da integridade e ao planejamento do reparo, subsidiando corretamente tomadas de decisão, de forma a mitigar riscos associados à segurança do trabalho, aos impactos ambientais e as perdas financeiras, causadas por um vazamento de hidrocarbonetos, seja em uma estação de compressão de um gasoduto, em uma unidade de tratamento de gás, em uma refinaria de petróleo ou, ainda, em uma plataforma de produção *offshore*.

4. CONCLUSÃO

Mesmo utilizando-se uma Rede de Análise Paraconsistente de simples configuração, a partir dos resultados apresentados neste trabalho, demonstrou-se que a Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de Dois Valores (LPA2v) é eficiente para fornecer uma predição de falha por Fadiga Induzida por Vibração (VIF) em sistemas de tubulação, através da análise de sinais provenientes da medição da velocidade de vibração RMS ($\dot{X}_{RMS}$) e do parâmetro conhecido como probabilidade de falha ou *Likelihood of Failure* (LOF) – conforme metodologia utilizada pelo Energy Institute Guidelines. A rede de análise proposta foi capaz de associar o nível de vibração presente, em função do tipo de excitação e do seu arranjo físico, ao risco de falha por VIF. Portanto, os resultados indicam que seria possível desenvolver aplicações de inteligência artificial, onde sistemas de controle ou especialistas poderiam tomar decisões em unidades de processo, por meio da monitoração e tratamento de informações relacionadas ao fenômeno de vibração em sistemas de tubulações considerados críticos à operação. Por utilizar os algoritmos da LPA2v, tais sistemas seriam eficientes, mesmo na presença de ruídos capazes de conferir um determinado grau de incerteza aos sinais de entrada, agregando maior nível de confiabilidade à previsão das falhas.

4.1. Trabalhos Futuros

A Rede de Análise Paraconsistente utilizada neste trabalho foi elaborada a partir do tipo de excitação presente em unidades equipadas com compressores alternativos, devido ao estudo de caso utilizado para calibração do modelo computacional desenvolvido no CAESAR II®. Uma possibilidade de continuidade deste estudo, seria o desenvolvimento de redes que contemplassem outros tipos de excitações, previstas no Energy Institute – sejam de origem mecânica (vibrações oriundas da operação de outros tipos de máquinas de grande porte: bombas centrífugas de grandes vazões, compressores centrífugos para elevadas pressões, turbinas utilizadas em turbogeradores, etc.), sejam de origem hidráulica (cavitação, golpes de aríete, surge, etc.). Uma outra possibilidade, em sinergia ao movimento

de transformação digital, cada vez mais evidente na indústria, seria o desenvolvimento de um *software* especialista, em linguagem de programação, destinado a tarefa de monitoração, com o objetivo de automatizar a tomada de decisão para o problema da falha por VIF em sistemas de tubulação de plantas de processo. Por fim, poderiam ser pesquisadas, ainda, outras normas utilizadas para análise de vibração em tubulações industriais que apresentem propostas, métodos ou critérios diferentes daqueles utilizados pelo Energy Institute, com o intuito de se promover melhorias na rede de análise proposta.

5. 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, p. 1175-1181. 2019.

DA SILVA FILHO, J. I. **Treatment of Uncertainties with Algorithms of the Paraconsistent Annotated Logic**. Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, v. 4, n. 2, p. 144-153. Maio 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/jilsa.2012.42014>> Acesso em: 13 mai. 2022.

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.

DA SILVA FILHO, J. I.; CAMARGO, J. M.; SANTOS, M. R.; ONUKI, A. S.; MARIO, M. C.; FERRARA, L. F. P.; GARCIA, D. V.; PEREIRA, J. M. C; ROCCO, A. **Support at Decision in Electrical Systems of Subtransmission Through Selection of Topologies by a Paraconsistent Simulator**. IEEE Latin America Transactions, v.14, n.4, p. 1993-1999. Abril 2016.

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

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

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

HARPER, C. B. **Integrity Evaluation of Small Bore Connections (Branch Connections)**. *In*: Proceedings of the 9th Conference of the Energy Frontier Research Center. Viena: 10-12 de setembro de 2014. Material disponível em: <[https://www.betamachinery.com/assets/pdfs/Technical_Articles/Integrity_Evaluation_of_Small_Bore_Connections_\(Branch_Connections\).pdf](https://www.betamachinery.com/assets/pdfs/Technical_Articles/Integrity_Evaluation_of_Small_Bore_Connections_(Branch_Connections).pdf)> Acesso em: 07 fev. 2022.

HARPER, C.; SCHUBRING, S. **Root Cause of Piping Failures: Reliability Issues for Compressor Systems**. *In*: Gas Machinery Conference 2014. Nashville: 5-8 de outubro de 2014. Material disponível em: <[https://www.betamachinery.com/assets/pdfs/Root_Cause_of_Piping_Failures_-_Reliability_Issues_for_Compressor_Systems_\(GMC_2014\).pdf](https://www.betamachinery.com/assets/pdfs/Root_Cause_of_Piping_Failures_-_Reliability_Issues_for_Compressor_Systems_(GMC_2014).pdf)> Acesso em: 16 abr. 2022.

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. **HSE OTR 028: Offshore Technology Report N° 028 – Transient Vibration Guidelines for Fast Acting Valves Screening Assessment**. HSE, Southampton, 2002, 33 p. Disponível em: <<https://www.hse.gov.uk/research/otopdf/2002/oto02028.pdf>> Acesso em: 10 mar. 2022.

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. **HSE RR 672: Research Report N° RR 672 – Offshore Hydrocarbon Releases 2001-2008**. HSE, Buxton, 2008, 80 p. Disponível em: <<https://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr672.htm>> Acesso em: 20 abr. 2021.

HEXAGON PPM. **TC2D1003: CAESAR II Dynamics – Harmonic Loading Example (TDRPMP)**. Intergraph Corporation, Madison, 2017. Material não publicado, referente a curso realizado na Tecnologia, São Paulo, em 20 e 21 ago. 2018.

INMAN, D. J. **Vibrações Mecânicas**. Tradução e revisão científica: Juliano G. Iossaquí. 4ª Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018, 667 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 20816-8 2018: Mechanical Vibration – Measurement and Evaluation of Machine Vibration – Part 8: Reciprocating Compressor Systems**. ISO, Switzerland, 2018, 42 p.

KACANI, V. **Vibration Analysis in Reciprocating Compressors**. In: 10th International Conference on Compressor and their Systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 232, n. 012016, p. 1-11, 2017.

KEPRATE, A., RATNAYAKE, R. M. C. **Use of AHP for Risk Based Fatigue Degradation Inspection Analysis of Topside Piping on Offshore Production and Process Facilities**. 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. IEEM, Singapura, 2015, pp. 737-741. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEM.2015.7385745>.

KEPRATE, A., RATNAYAKE, R. M. C. **Enhancing Offshore Process Safety by Selecting Fatigue Critical Piping Locations for Inspection Using Fuzzy-AHP Based Approach**. Process Safety and Environmental Protection, v. 102, p. 71-87. 2016.

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.

LIU, E.; WANG, X.; ZHAO, W.; SU, Z.; CHEN, Q. **Analysis and Research on Pipeline Vibration of a Natural Gas Compressor Station and Vibration Reduction Measures**. Energy Fuels, v. 35, p. 479-492, 2021.

LIU, W.; JIANG, Z.; WANG, Y.; ZHOU, C.; SUN, X.; ZHANG, J. **Performance Degradation Analysis and Optimization of the Stepless Capacity Regulation System for Reciprocating Compressors**. *Applied Sciences*, v. 10, n°. 704, p. 1-24, 2020.

LU, H.; HUANG, K.; WU, S. **Vibration and Stress Analyses of Positive Displacement Pump Pipeline Systems in Oil Transportation Stations**. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.*, v. 7, n° 1: 05015002, p. 1-11, 2016.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000205](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000205).

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, 2020.

MENDONÇA, C. O. **Application of the Modal Expansion Method in the Prediction of Dynamic Responses in a Reciprocating Compressor Interstage Piping System**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2020. 107 P. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

MERIKOSKI, M. **Pipe Vibrations in Nuclear Power Plants**. Tampere: Tampere University, 2017. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Master's Degree Programme in Mechanical Engineering, Tampere University of Technology, Tampere, 2017.

MILJKOVIĆ, D. **Brief Review of Vibration Based Machine Condition Monitoring**. *Materials Science*, Corpus ID 9089074, Croácia, p. 14-23, 2015. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Brief-Review-of-Vibration-Based-Machine-Condition-Miljkovic/6b94b204c5be94b51e8bc30ae15757937f3cb297>> Acesso em: 19 fev. 2022.

OLIVEIRA, J. J. M.; DA SILVA FILHO, J. I. **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**. *Brazilian Journal of Development*. Curitiba, 2022, v.8, n.8, p. 55497–55513.
DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n8-053>.

PAPADOPOULOS, A.; ABOULELLA, M. **Piping Evaluation of Flow Induced Vibrations Using Harmonic Loads**. *In: Proceedings of the ASME 2018: Pressure Vessel and Piping Conference – PVP2018*, Praga – República Checa, p. 1-11, julho de 2018.

SWINDELL, R. **Vibration Fatigue in Process Pipework: A Risk Based Assessment Methodology**. *In: Risk, Reliability and Societal Safety – Aven & Vinnem*. 2007 Taylor Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44786-7, p. 2543-2547, 2007.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B31.3-2020: Process Piping – ASME Code for Pressure Piping, B31.**, 2020, 554 p.

TIAN, J.; YUAN, C.; YANG, L.; WU, C.; LIU, G.; YANG, Z. **The Vibration Analysis Model of Pipeline Under the Action of Gas Pressure Pulsation Coupling.** Engineering Failure Analysis, v. 66, p. 328-340, 2016.

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

XENOS, H. G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva: O Caminho para Eliminar Falhas nos Equipamentos e Aumentar a Produtividade.** 2ª Ed. Nova Lima: Falconi Editora, 2014, 312 p.

ZAJAM, S.; JOSHI, T.; BHATTACHARYA, B. **Application of Wavelet Analysis and Machine Learning on Vibration Data from Gas Pipelines for Structural Health Monitoring.** In: 2nd International Conference on Structural Integrity and Exhibition 2018. Procedia Structural Integrity, v. 14, p. 712-719, 2019.

APÊNDICE

Tabelas com os principais resultados obtidos pela Rede de Análise Paraconsistente (RAP), proposta no presente trabalho.

Tabela 5 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso #1];

Tabela 6 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso #2];

Tabela 7 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso #3];

Tabela 8 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso 50%];

Tabela 9 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso 25%].

Relatórios gerados na simulação computacional 3D para o sistema de tubulação analisado no *software* CAESAR II® v. 11 (2019):

Relatório de Análise Estática (p. 94);

Relatório de Análise Modal (p. 112);

Relatório de Análise Harmônica (p. 115);

Resumo das Velocidades Obtidas na Análise Harmônica via CAESAR II® (p. 135).

Tabela 5 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso #1].

RESUMO COM PRINCIPAIS RESULTADOS PARA REDE DE ANÁLISE PARACONSISTENTE - CASO #1																			
TEMPO	NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE - NAP4							GRAU DE EVIDÊNCIA DE RISCO RESULTANTE							PREDIÇÃO PARA FALHA POR VIF				
	μ_{OK1}	$1-\mu_{OK3}$	G_c	G_{cl}	ϕ	D	G_{GR}	μ_{CR4}	$\mu_{Risco}(n-1)$	$\mu_{Risco}(n)$	$\mu_{Risco}(n+1)$	μ_{Risco}	μ_{CR}	X	μ_{fund}	m	Evento [dias]	Mês da Falha	
0	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0,5	0,223	0,098	0,125	-0,680	0,320	1,108	0,000	0,500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1	0,227	0,098	0,129	-0,675	0,325	1,102	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
1,5	0,235	0,098	0,138	-0,667	0,333	1,090	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
2	0,244	0,098	0,146	-0,659	0,341	1,079	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
2,5	0,256	0,098	0,158	-0,646	0,354	1,061	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
3	0,277	0,098	0,179	-0,625	0,375	1,032	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
3,5	0,298	0,098	0,200	-0,605	0,395	1,003	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
4	0,327	0,098	0,229	-0,576	0,424	0,962	0,038	0,519	0,500	0,500	0,519	0,509	0,491	0,528	1	0,001261	302	14	
4,5	0,360	0,098	0,262	-0,542	0,458	0,916	0,084	0,542	0,500	0,519	0,542	0,530	0,488	0,554	1	0,001550	231	12	
5	0,397	0,098	0,300	-0,505	0,495	0,863	0,137	0,568	0,519	0,542	0,568	0,555	0,487	0,600	1	0,001742	190	11	
5,5	0,447	0,098	0,350	-0,455	0,545	0,794	0,206	0,603	0,542	0,568	0,603	0,585	0,483	0,663	1	0,002318	128	10	
6	0,497	0,098	0,399	-0,405	0,595	0,724	0,276	0,638	0,568	0,603	0,638	0,620	0,483	0,723	1	0,002312	113	10	
6,5	0,547	0,098	0,449	-0,355	0,645	0,655	0,345	0,672	0,603	0,638	0,672	0,655	0,483	0,793	1	0,002303	99	10	
7	0,597	0,098	0,499	-0,305	0,695	0,587	0,413	0,707	0,638	0,672	0,707	0,689	0,483	0,862	1	0,002292	84	10	
7,5	0,651	0,098	0,553	-0,251	0,749	0,513	0,487	0,744	0,672	0,707	0,744	0,725	0,482	0,934	1	0,002465	63	10	
8	0,705	0,098	0,607	-0,197	0,803	0,440	0,560	0,780	0,707	0,744	0,780	0,761	0,482	1,005	1	0,002437	49	10	
8,5	0,759	0,098	0,661	-0,143	0,857	0,368	0,632	0,816	0,744	0,780	0,816	0,797	0,482	1,078	1	0,002392	35	10	
9	0,813	0,098	0,715	-0,089	0,911	0,298	0,702	0,851	0,780	0,816	0,851	0,833	0,483	1,148	1	0,002314	21	10	
9,5	0,867	0,098	0,769	-0,035	0,965	0,233	0,767	0,883	0,816	0,851	0,883	0,866	0,484	1,216	1	0,002168	8	10	
10	0,925	0,098	0,828	0,023	0,977	0,174	0,826	0,913	0,851	0,883	0,913	0,897	0,485	1,279	1	0,001978	0	0	
10,5	0,983	0,098	0,886	0,081	0,919	0,140	0,860	0,930	0,883	0,913	0,930	0,921	0,492	1,322	1	0,001128	0	0	
11	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,913	0,930	0,931	0,930	0,500	1,344	1	0,000066	0	0	
11,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,930	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
12	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
12,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
13	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
13,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
14	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
14,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
15	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
15,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
16	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
16,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
17	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
17,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
18	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
18,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
19	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
19,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
20	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
20,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
21	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
21,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
22	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
22,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
23	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
23,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
24	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
24,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
25	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
25,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
26	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
26,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
27	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
27,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
28	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
28,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
29	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,13,													

Tabela 6 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso #2].

RESUMO COM PRINCIPAIS RESULTADOS PARA REDE DE ANÁLISE PARACONSISTENTE - CASO #2																			
TEMPO	NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE - NAP4							GRAU DE EVIDÊNCIA DE RISCO RESULTANTE							PREDIÇÃO PARA FALHA POR VIF				
	μ_{OK1}	$1-\mu_{OK3}$	G_c	G_{cr}	ϕ	D	G_{GR}	μ_{CR4}	$\mu_{Risco}(n-1)$	$\mu_{Risco}(n)$	$\mu_{Risco}(n+1)$	μ_{Risco}	μ_{VR}	X	μ_{Rend}	m	Evento [dias]	Mês da Falha	
0	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0,5	0,223	0,098	0,125	-0,680	0,320	1,108	0,000	0,500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1	0,227	0,098	0,129	-0,675	0,325	1,102	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
1,5	0,235	0,098	0,138	-0,667	0,333	1,090	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
2	0,244	0,098	0,146	-0,659	0,341	1,079	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
2,5	0,256	0,098	0,158	-0,646	0,354	1,061	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
3	0,277	0,098	0,179	-0,625	0,375	1,032	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
3,5	0,298	0,098	0,200	-0,605	0,395	1,003	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
4	0,327	0,098	0,229	-0,576	0,424	0,962	0,038	0,519	0,500	0,500	0,519	0,509	0,491	0,528	1	0,001261	302	14	
4,5	0,360	0,098	0,262	-0,542	0,458	0,916	0,084	0,542	0,500	0,519	0,542	0,530	0,488	0,554	1	0,001550	231	12	
5	0,397	0,098	0,300	-0,505	0,495	0,863	0,137	0,568	0,519	0,542	0,568	0,555	0,487	0,600	1	0,001742	190	11	
5,5	0,447	0,098	0,350	-0,455	0,545	0,794	0,206	0,603	0,542	0,568	0,603	0,585	0,483	0,663	1	0,002318	128	10	
6	0,497	0,098	0,399	-0,405	0,595	0,724	0,276	0,638	0,568	0,603	0,638	0,620	0,483	0,723	1	0,002312	113	10	
6,5	0,547	0,098	0,449	-0,355	0,645	0,655	0,345	0,672	0,603	0,638	0,672	0,655	0,483	0,793	1	0,002303	99	10	
7	0,597	0,098	0,499	-0,305	0,695	0,587	0,413	0,707	0,638	0,672	0,707	0,689	0,483	0,862	1	0,002292	84	10	
7,5	0,651	0,098	0,553	-0,251	0,749	0,513	0,487	0,744	0,672	0,707	0,744	0,725	0,482	0,934	1	0,002465	63	10	
8	0,705	0,098	0,607	-0,197	0,803	0,440	0,560	0,780	0,707	0,744	0,780	0,761	0,482	1,005	1	0,002437	49	10	
8,5	0,759	0,098	0,661	-0,143	0,857	0,368	0,632	0,816	0,744	0,780	0,816	0,797	0,482	1,078	1	0,002392	35	10	
9	0,813	0,098	0,715	-0,089	0,911	0,298	0,702	0,851	0,780	0,816	0,851	0,833	0,483	1,148	1	0,002314	21	10	
9,5	0,867	0,098	0,769	-0,035	0,965	0,233	0,767	0,883	0,816	0,851	0,883	0,866	0,484	1,216	1	0,002168	8	10	
10	0,925	0,098	0,828	0,023	0,977	0,174	0,826	0,913	0,851	0,883	0,913	0,897	0,485	1,279	1	0,001978	0	0	
10,5	0,983	0,098	0,886	0,081	0,919	0,140	0,860	0,930	0,883	0,913	0,930	0,921	0,492	1,322	1	0,001128	0	0	
11	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,913	0,930	0,931	0,930	0,500	1,344	1	0,000066	0	0	
11,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,930	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
12	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
12,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
13	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
13,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
14	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
14,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
15	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
15,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
16	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
16,5	0,597	0,098	0,499	-0,305	0,695	0,587	0,413	0,707	0,931	0,931	0,707	0,787	0,612	0,000	0	-0,014948	-	-	
17	0,510	0,098	0,412	-0,393	0,607	0,707	0,293	0,646	0,931	0,707	0,646	0,675	0,530	0,000	0	-0,004019	-	-	
17,5	0,431	0,098	0,333	-0,472	0,528	0,817	0,183	0,591	0,707	0,646	0,591	0,618	0,527	0,000	0	-0,003661	-	-	
18	0,356	0,098	0,258	-0,546	0,454	0,921	0,079	0,539	0,646	0,591	0,539	0,565	0,526	0,000	0	-0,003482	-	-	
18,5	0,347	0,098	0,250	-0,555	0,445	0,933	0,067	0,533	0,591	0,539	0,533	0,536	0,503	0,000	0	-0,000387	-	-	
19	0,339	0,098	0,241	-0,563	0,437	0,945	0,055	0,528	0,539	0,533	0,528	0,531	0,503	0,000	0	-0,000388	-	-	
19,5	0,327	0,098	0,229	-0,576	0,424	0,962	0,038	0,519	0,533	0,528	0,519	0,523	0,504	0,000	0	-0,000582	-	-	
20	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,528	0,519	0,516	0,517	0,501	0,000	0	-0,000194	-	-	
20,5	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,519	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
21	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
21,5	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
22	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
22,5	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
23	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
23,5	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
24	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
24,5	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
25	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
25,5	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
26	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
26,5	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
27	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
27,5	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
28	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
28,5	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420	0,968	0,032	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
29	0,323	0,098	0,225	-0,580	0,420														

Tabela 7 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso #3].

RESUMO COM PRINCIPAIS RESULTADOS PARA REDE DE ANÁLISE PARACONSISTENTE - CASO #3																			
TEMPO	NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE - NAP4							GRAU DE EVIDÊNCIA DE RISCO RESULTANTE							PREDIÇÃO PARA FALHA POR VIF				
	μ_{OK1}	$1-\mu_{OK3}$	G_c	G_{ct}	ϕ	D	G_{GR}	μ_{CR4}	$\mu_{Risco}(n-1)$	$\mu_{Risco}(n)$	$\mu_{Risco}(n+1)$	μ_{Risco}	μ_{CR}	X	μ_{fund}	m	Evento [dias]	Mês da Falha	
0	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0,5	0,223	0,098	0,125	-0,680	0,320	1,108	0,000	0,500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1	0,227	0,098	0,129	-0,675	0,325	1,102	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
1,5	0,235	0,098	0,138	-0,667	0,333	1,090	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
2	0,244	0,098	0,146	-0,659	0,341	1,079	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
2,5	0,256	0,098	0,158	-0,646	0,354	1,061	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
3	0,277	0,098	0,179	-0,625	0,375	1,032	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
3,5	0,298	0,098	0,200	-0,605	0,395	1,003	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
4	0,327	0,098	0,229	-0,576	0,424	0,962	0,038	0,519	0,500	0,500	0,519	0,509	0,491	0,528	1	0,001261	302	14	
4,5	0,360	0,098	0,262	-0,542	0,458	0,916	0,084	0,542	0,500	0,519	0,542	0,530	0,488	0,554	1	0,001550	231	12	
5	0,397	0,098	0,300	-0,505	0,495	0,863	0,137	0,568	0,519	0,542	0,568	0,555	0,487	0,600	1	0,001742	190	11	
5,5	0,447	0,098	0,350	-0,455	0,545	0,794	0,206	0,603	0,542	0,568	0,603	0,585	0,483	0,663	1	0,002318	128	10	
6	0,497	0,098	0,399	-0,405	0,595	0,724	0,276	0,638	0,568	0,603	0,638	0,620	0,483	0,723	1	0,002312	113	10	
6,5	0,547	0,098	0,449	-0,355	0,645	0,655	0,345	0,672	0,603	0,638	0,672	0,655	0,483	0,793	1	0,002303	99	10	
7	0,597	0,098	0,499	-0,305	0,695	0,587	0,413	0,707	0,638	0,672	0,707	0,689	0,483	0,862	1	0,002292	84	10	
7,5	0,651	0,098	0,553	-0,251	0,749	0,513	0,487	0,744	0,672	0,707	0,744	0,725	0,482	0,934	1	0,002465	63	10	
8	0,705	0,098	0,607	-0,197	0,803	0,440	0,560	0,780	0,707	0,744	0,780	0,761	0,482	1,005	1	0,002437	49	10	
8,5	0,759	0,098	0,661	-0,143	0,857	0,368	0,632	0,816	0,744	0,780	0,816	0,797	0,482	1,078	1	0,002392	35	10	
9	0,813	0,098	0,715	-0,089	0,911	0,298	0,702	0,851	0,780	0,816	0,851	0,833	0,483	1,148	1	0,002314	21	10	
9,5	0,867	0,098	0,769	-0,035	0,965	0,233	0,767	0,883	0,816	0,851	0,883	0,866	0,484	1,216	1	0,002168	8	10	
10	0,925	0,098	0,828	0,023	0,977	0,174	0,826	0,913	0,851	0,883	0,913	0,897	0,485	1,279	1	0,001978	0	0	
10,5	0,983	0,098	0,886	0,081	0,919	0,140	0,860	0,930	0,883	0,913	0,930	0,921	0,492	1,322	1	0,001128	0	0	
11	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,913	0,930	0,931	0,930	0,500	1,344	1	0,000066	0	0	
11,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,930	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
12	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
12,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
13	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
13,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
14	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
14,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
15	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
15,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
16	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
16,5	0,597	0,098	0,499	-0,305	0,695	0,587	0,413	0,707	0,931	0,931	0,707	0,787	0,612	0,000	0	-0,014948	-	-	
17	0,510	0,098	0,412	-0,393	0,607	0,707	0,293	0,646	0,931	0,707	0,646	0,675	0,530	0,000	0	-0,004019	-	-	
17,5	0,431	0,098	0,333	-0,472	0,528	0,817	0,183	0,591	0,707	0,646	0,591	0,618	0,527	0,000	0	-0,003661	-	-	
18	0,356	0,098	0,258	-0,546	0,454	0,921	0,079	0,539	0,646	0,591	0,539	0,565	0,526	0,000	0	-0,003482	-	-	
18,5	0,347	0,098	0,250	-0,555	0,445	0,933	0,067	0,533	0,591	0,539	0,533	0,536	0,503	0,000	0	-0,000387	-	-	
19	0,385	0,098	0,287	-0,517	0,483	0,881	0,119	0,560	0,539	0,533	0,560	0,546	0,487	0,612	1	0,001743	195	26	
19,5	0,476	0,098	0,379	-0,426	0,574	0,753	0,247	0,623	0,533	0,560	0,623	0,590	0,468	0,689	1	0,004248	65	22	
20	0,568	0,098	0,470	-0,335	0,665	0,627	0,373	0,687	0,560	0,623	0,687	0,654	0,468	0,778	1	0,004222	51	22	
20,5	0,663	0,098	0,566	-0,239	0,761	0,496	0,504	0,752	0,623	0,687	0,752	0,717	0,467	0,908	1	0,004366	34	22	
21	0,759	0,098	0,661	-0,143	0,857	0,368	0,632	0,816	0,687	0,752	0,816	0,782	0,468	1,035	1	0,004263	20	22	
21,5	0,863	0,098	0,765	-0,039	0,961	0,238	0,762	0,881	0,752	0,816	0,881	0,845	0,468	1,166	1	0,004323	4	22	
22	0,967	0,098	0,869	0,064	0,936	0,146	0,854	0,927	0,816	0,881	0,927	0,901	0,477	1,266	1	0,003072	0	0	
22,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,881	0,927	0,931	0,929	0,498	1,314	1	0,000259	0	0	
23	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,927	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
23,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
24	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
24,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
25	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
25,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
26	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
26,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
27	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
27,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
28	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
28,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
29	1,000																		

Tabela 8 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso 50%].

RESUMO COM PRINCIPAIS RESULTADOS PARA REDE DE ANÁLISE PARACONSISTENTE - CASO 50%																			
TEMPO	NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE - NAP4							GRAU DE EVIDÊNCIA DE RISCO RESULTANTE							PREDIÇÃO PARA FALHA POR VIF				
	μ_{OK1}	$1-\mu_{OK1}$	G_1	G_2	ϕ	D	G_{OK}	μ_{OK4}	$\mu_{Risco}(n-1)$	$\mu_{Risco}(n)$	$\mu_{Risco}(n+1)$	μ_{Risco}	μ_{CV}	X	μ_{fund}	m	Evento [dias]	Mês da Falha	
0	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
1,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
2	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
2,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
3	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
3,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
4	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
4,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
5,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
6	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
6,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
7	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
7,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
8	0,223	0,098	0,125	-0,680	0,320	1,108	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
8,5	0,250	0,098	0,152	-0,652	0,348	1,070	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
9	0,277	0,098	0,179	-0,625	0,375	1,032	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
9,5	0,304	0,098	0,206	-0,598	0,402	0,994	0,006	0,503	0,500	0,500	0,503	0,501	0,499	0,504	1	0,000194	2042,6	77,6	
10	0,333	0,098	0,235	-0,569	0,431	0,953	0,047	0,523	0,500	0,503	0,523	0,513	0,490	0,533	1	0,001358	277,5	19,2	
10,5	0,362	0,098	0,264	-0,540	0,460	0,913	0,087	0,544	0,503	0,523	0,544	0,533	0,490	0,557	1	0,001356	262,7	19,3	
11	0,391	0,098	0,293	-0,511	0,489	0,872	0,128	0,564	0,523	0,544	0,564	0,554	0,490	0,597	1	0,001355	248,0	19,3	
11,5	0,420	0,098	0,323	-0,482	0,518	0,831	0,169	0,584	0,544	0,564	0,584	0,574	0,490	0,638	1	0,001353	233,3	19,3	
12	0,451	0,098	0,354	-0,451	0,549	0,788	0,212	0,606	0,564	0,584	0,606	0,595	0,489	0,681	1	0,001448	203,1	18,8	
12,5	0,480	0,098	0,383	-0,422	0,578	0,748	0,252	0,626	0,584	0,606	0,626	0,616	0,490	0,721	1	0,001349	202,9	19,3	
13	0,514	0,098	0,416	-0,389	0,611	0,701	0,299	0,649	0,606	0,626	0,649	0,638	0,488	0,767	1	0,001539	162,9	18,4	
13,5	0,545	0,098	0,447	-0,357	0,643	0,658	0,342	0,671	0,626	0,649	0,671	0,660	0,489	0,808	1	0,001439	159,2	18,8	
14	0,578	0,098	0,480	-0,324	0,676	0,612	0,388	0,694	0,649	0,671	0,694	0,682	0,489	0,855	1	0,001530	134,8	18,5	
14,5	0,611	0,098	0,514	-0,291	0,709	0,567	0,433	0,717	0,671	0,694	0,717	0,705	0,489	0,899	1	0,001524	120,3	18,5	
15	0,647	0,098	0,549	-0,256	0,744	0,518	0,482	0,741	0,694	0,717	0,741	0,728	0,488	0,947	1	0,001610	98,8	18,3	
15,5	0,682	0,098	0,584	-0,220	0,780	0,470	0,530	0,765	0,717	0,741	0,765	0,753	0,488	0,993	1	0,001599	84,5	18,3	
16	0,717	0,098	0,620	-0,185	0,815	0,423	0,577	0,789	0,741	0,765	0,789	0,776	0,488	1,041	1	0,001583	70,4	18,3	
16,5	0,753	0,098	0,655	-0,150	0,850	0,376	0,624	0,812	0,765	0,789	0,812	0,800	0,488	1,089	1	0,001562	56,3	18,4	
17	0,790	0,098	0,692	-0,112	0,888	0,327	0,673	0,836	0,789	0,812	0,836	0,824	0,488	1,137	1	0,001621	39,3	18,3	
17,5	0,830	0,098	0,732	-0,073	0,927	0,278	0,722	0,861	0,812	0,836	0,861	0,848	0,488	1,186	1	0,001654	23,5	18,3	
18	0,869	0,098	0,771	-0,033	0,967	0,231	0,769	0,885	0,836	0,861	0,885	0,872	0,488	1,233	1	0,001559	9,9	18,3	
18,5	0,909	0,098	0,811	0,006	0,994	0,189	0,811	0,905	0,861	0,885	0,905	0,894	0,490	1,277	1	0,001393	0,0	0,0	
19	0,950	0,098	0,852	0,048	0,952	0,155	0,845	0,922	0,885	0,905	0,922	0,913	0,491	1,315	1	0,001137	0,0	0,0	
19,5	0,992	0,098	0,894	0,089	0,911	0,139	0,861	0,931	0,905	0,922	0,931	0,926	0,496	1,340	1	0,000548	0,0	0,0	
20	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,922	0,931	0,931	0,931	0,500	1,353	1	0,000016	0,0	0,0	
20,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
21	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
21,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
22	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
22,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
23	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
23,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
24	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
24,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
25	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
25,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
26	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
26,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
27	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
27,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
28	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,500	0,000	0	0,000000	-	-	
28,5	1,000	0,098	0,902	0,098	0,902	0,138	0,862	0,931	0,931	0,931	0,931	0,							

Tabela 9 - Principais Resultados para Rede de Análise Paraconsistente [Caso 25%].

RESUMO COM PRINCIPAIS RESULTADOS PARA REDE DE ANÁLISE PARACONSISTENTE - CASO 25%																		
TEMPO	NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE - NAP4							GRAU DE EVIDÊNCIA DE RISCO RESULTANTE							PREDIÇÃO PARA FALHA POR VIF			
	μ_{OK1}	$1-\mu_{OK3}$	G_c	G_{cr}	ϕ	D	G_{OK}	μ_{OK4}	$\mu_{Risco}(n-1)$	$\mu_{Risco}(n)$	$\mu_{Risco}(n+1)$	μ_{Risco}	μ_{cv}	X	μ_{fund}	m	Evento [dias]	Mês da Falha
0	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
1,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
2	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
2,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
3	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
3,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
4	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
4,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
5,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
6	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
6,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
7	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
7,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
8	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
8,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
9	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
9,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
10	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
10,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
11	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
11,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
12	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
12,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
13	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
13,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
14	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
14,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
15	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
15,5	0,219	0,098	0,121	-0,684	0,316	1,114	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
16	0,229	0,098	0,131	-0,673	0,327	1,099	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
16,5	0,247	0,098	0,149	-0,656	0,344	1,074	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
17	0,265	0,098	0,168	-0,637	0,363	1,048	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
17,5	0,285	0,098	0,187	-0,617	0,383	1,020	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0	0,000000	-	-
18	0,305	0,098	0,207	-0,597	0,403	0,993	0,007	0,504	0,500	0,500	0,504	0,500	0,498	0,505	1	0,000243	1631,7	72,4
18,5	0,325	0,098	0,227	-0,578	0,422	0,965	0,035	0,517	0,500	0,504	0,517	0,502	0,493	0,524	1	0,000921	415,2	32,3
19	0,345	0,098	0,248	-0,557	0,443	0,936	0,064	0,532	0,504	0,517	0,532	0,511	0,493	0,543	1	0,000969	379,7	31,7
19,5	0,366	0,098	0,268	-0,536	0,464	0,907	0,093	0,547	0,517	0,532	0,547	0,525	0,493	0,571	1	0,000969	364,9	31,7
20	0,388	0,098	0,290	-0,514	0,486	0,876	0,124	0,562	0,532	0,547	0,562	0,539	0,492	0,601	1	0,001016	332,8	31,1
20,5	0,411	0,098	0,313	-0,491	0,509	0,845	0,155	0,578	0,547	0,562	0,578	0,554	0,492	0,632	1	0,001064	303,0	30,6
21	0,434	0,098	0,336	-0,469	0,531	0,813	0,187	0,594	0,562	0,578	0,594	0,570	0,492	0,663	1	0,001063	288,3	30,6
21,5	0,458	0,098	0,360	-0,445	0,555	0,779	0,221	0,610	0,578	0,594	0,610	0,586	0,492	0,696	1	0,001110	261,1	30,2
22	0,482	0,098	0,384	-0,421	0,579	0,746	0,254	0,627	0,594	0,610	0,627	0,602	0,492	0,729	1	0,001108	246,5	30,2
22,5	0,508	0,098	0,410	-0,395	0,605	0,710	0,290	0,645	0,610	0,627	0,645	0,619	0,491	0,764	1	0,001202	212,1	29,6
23	0,533	0,098	0,436	-0,369	0,631	0,674	0,326	0,663	0,627	0,645	0,663	0,636	0,491	0,799	1	0,001200	197,5	29,6
23,5	0,560	0,098	0,463	-0,342	0,658	0,637	0,363	0,682	0,645	0,663	0,682	0,654	0,491	0,836	1	0,001245	175,4	29,3
24	0,588	0,098	0,490	-0,315	0,685	0,599	0,401	0,700	0,663	0,682	0,700	0,672	0,491	0,873	1	0,001241	160,9	29,4
24,5	0,617	0,098	0,519	-0,286	0,714	0,560	0,440	0,720	0,682	0,700	0,720	0,691	0,490	0,912	1	0,001332	135,0	29,0
25	0,647	0,098	0,549	-0,256	0,744	0,518	0,482	0,741	0,700	0,720	0,741	0,710	0,490	0,951	1	0,001373	115,9	28,9
25,5	0,677	0,098	0,579	-0,225	0,775	0,477	0,523	0,761	0,720	0,741	0,761	0,730	0,490	0,992	1	0,001365	101,6	28,9
26	0,709	0,098	0,611	-0,193	0,807	0,434	0,566	0,783	0,741	0,761	0,783	0,751	0,489	1,035	1	0,001447	80,9	28,7
26,5	0,743	0,098	0,646	-0,159	0,841	0,388	0,612	0,806	0,761	0,783	0,806	0,772	0,489	1,079	1	0,001522	61,9	28,6
27	0,779	0,098	0,681	-0,124	0,876	0,342	0,658	0,829	0,783	0,806	0,829	0,794	0,488	1,124	1	0,001541	46,1	28,5
27,5	0,815	0,098	0,717	-0,087	0,913	0,296	0,704	0,852	0,806	0,829	0,852	0,817	0,488	1,170	1	0,001544	31,0	28,5
28	0,854	0,098	0,756	-0,049	0,951	0,249	0,751	0,875	0,829	0,852	0,875	0,840	0,488	1,216	1	0,001559	15,7	28,5
28,5	0,893	0,098	0,795	-0,009	0,991	0,205	0,795	0,898	0,852	0,875	0,898							

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

RELATÓRIO DE ANÁLISE ESTÁTICA

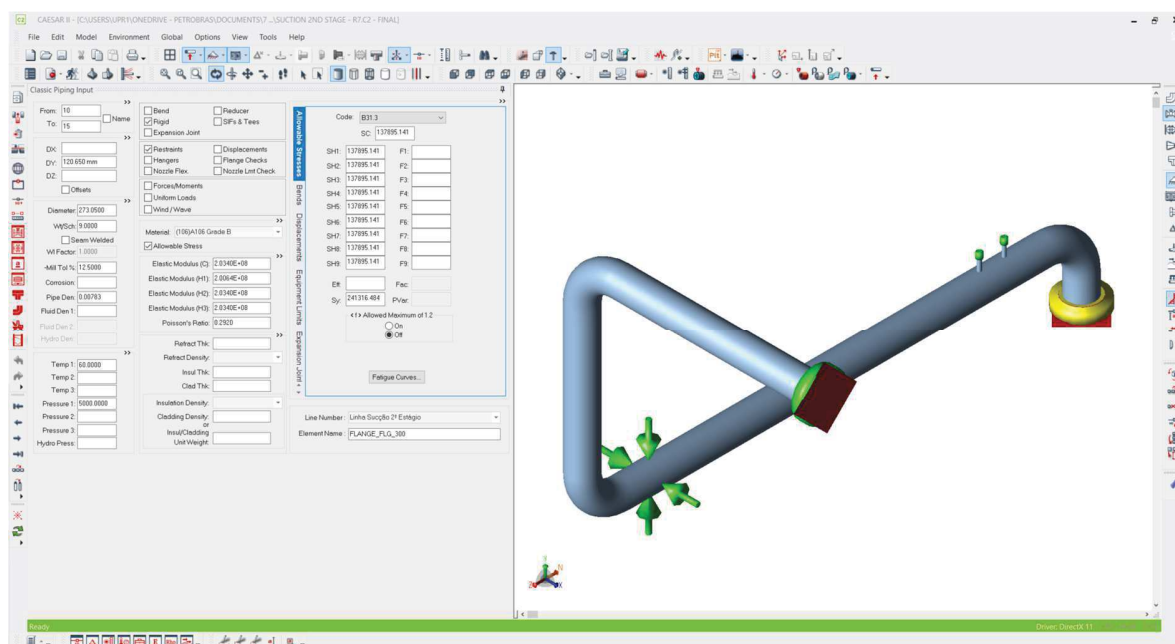
Table of Contents

LISTING OF STATIC LOAD CASES FOR THIS ANALYSIS.....	95
INPUT LISTING.....	96
Displacements : 1 (HYD) WW+HP	104
Displacements : 2 (OPE) W+T1+P1.....	105
Displacements : 3 (Alt-SUS) W+P1	106
Displacements : 4 (SUS) W+P1	107
Displacements : 5 (EXP) L5=L2-L4	108
Restraint Summary : Multiple.....	109
Stress Summary (Legacy) : Multiple.....	110

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

LISTING OF STATIC LOAD CASES FOR THIS ANALYSIS

- 1 (HYD) WW+HP
- 2 (OPE) W+T1+P1
- 3 (Alt-SUS) W+P1
- 4 (SUS) W+P1
- 5 (EXP) L5=L2-L4



Print da Tela do CAESAR II® v. 11 (2019)

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

Job Description:

PROJECT: ANALISE DE VIBRACAO EM TUBULACAO DE PROCESSO

CLIENT : UNISANTA - MESTRADO

ANALYST: JOSE JEFFERSON MORAIS DE OLIVEIRA

NOTES :

- 1 - Sistema de Tubulacao de Planta de Compressao;
- 2 - Compressor do Alternativo (Pistao);
- 3 - Rotacao do Compressor: 375 RPM;
- 4 - Linha de succao do segundo estagio;
- 5 - Modelo Final Ajustado para Simulacao.

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 19: 6:14

PIPE DATA

 From 10 To 15 DY= 120.650 mm.

PIPE

Dia= 273.050 mm. Wall= 9.000 mm. Element Name= FLANGE_FLG_300

GENERAL

T1= 60 C P1= 5,000.0000 KPa Mat= (106)A106 Grade B E= 203,395,328

KPa

EH1= 200,637,424 KPa EH2= 203,395,328 KPa EH3= 203,395,328 KPa

EH4= 203,395,328 KPa EH5= 203,395,328 KPa EH6= 203,395,328 KPa

EH7= 203,395,328 KPa EH8= 203,395,328 KPa EH9= 203,395,328 KPa

v = .292 Pipe Den= .0078334 kg./cu.cm. Insul Thk= .000 mm.

RIGID Weight= 409.24 N.

RESTRAINTS

Node 10 ANC

ALLOWABLE STRESSES

B31.3 (2016) Cycle Max Switch = --- Sc= 137,895 KPa

Sh1= 137,895 KPa Sh2= 137,895 KPa Sh3= 137,895 KPa Sh4= 137,895 KPa

Sh5= 137,895 KPa Sh6= 137,895 KPa Sh7= 137,895 KPa Sh8= 137,895 KPa

Sh9= 137,895 KPa Sy= 241,316 KPa

 From 15 To 20 DY= 579.350 mm.

GENERAL

P1= 5,000.0000 KPa PHyd= 7,500.0000 KPa

BEND at "TO" end

Radius= 381.000 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 19

Angle/Node @2= .00 18

 From 20 To 30 DZ= 380.000 mm.

 From 30 To 33 DZ= 400.000 mm.

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

 From 33 To 35 DZ= 250.000 mm.

From 35 To 40 DZ= 525.000 mm.

From 40 To 45 DZ= 620.000 mm.

From 45 To 50 DZ= 745.000 mm.

From 50 To 55 DZ= 720.000 mm.

From 55 To 60 DZ= 720.000 mm.

RESTRAINTS

Node 60 X Mu = .30

Node 60 Y Mu = .30

From 60 To 70 DZ= 670.000 mm.

BEND at "TO" end

Radius= 381.000 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 69

Angle/Node @2= .00 68

From 70 To 80 DY= 460.000 mm.

From 80 To 90 DY= 740.000 mm.

From 90 To 95 DY= 520.000 mm.

From 95 To 100 DY= 520.000 mm.

BEND at "TO" end

Radius= 381.000 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 99

Angle/Node @2= .00 98

From 100 To 110 DX= 850.000 mm.

From 110 To 112 DX= 739.675 mm.

From 112 To 115 DX= 739.675 mm.

From 115 To 120 DX= 120.650 mm.

Element Name= FLANGE_FLG_300

RIGID Weight= 409.24 N.

RESTRAINTS

Node 120 ANC K= 6,000,000 N./cm. Kr= 6,000,000 N.m./deg

From 33 To 200 DY= 242.000 mm.

PIPE

Dia= 33.401 mm. Wall= 6.350 mm.

Insul Thk= .000 mm.

SIF's & TEE's

Node 33 Weldolet

From 200 To 210 DY= 65.088 mm.

Element Name= FLANGE_FLG_300

RIGID Weight= 22.50 N.

From 35 To 250 DY= 242.000 mm.

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

PIPE

Dia= 33.401 mm. Wall= 6.350 mm.

Insul Thk= .000 mm.

SIF's & TEE's

Node 35 Weldolet

 From 250 To 260 DY= 65.088 mm.

Element Name= FLANGE_FLG_300

RIGID Weight= 22.50 N.

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 19: 6:14

MATERIAL Changes:

10

15

Mat= (106)A106 Grade B E= 203,395,328 KPa v = .292

Density= .0078 kg./cu.cm.

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 19: 6:14

JOBNAME: C:\USERS\UPR1\ONEDRIVE - PETROBRAS\DOCUMENTS\7 - CURSOS E

TREINAMENTOS

ALLOWABLE STRESS Changes

10

15

B31.3 (2016) Cycle Max Switch = --- Sc= 137,895 KPa

Sh1= 137,895 KPa Sh2= 137,895 KPa Sh3= 137,895 KPa Sh4= 137,895 KPa

Sh5= 137,895 KPa Sh6= 137,895 KPa Sh7= 137,895 KPa Sh8= 137,895 KPa

Sh9= 137,895 KPa Sy= 241,316 KPa

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 19: 6:14

BEND ELEMENTS

15

20

Radius= 381.000 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 19

Angle/Node @2= .00 18

60

70

Radius= 381.000 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 69

Angle/Node @2= .00 68

95

100

Radius= 381.000 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 99

Angle/Node @2= .00 98

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 19: 6:14

RIGIDS

10	15
----	----

Weight= 409.24 N.Type=Flange	
115	120

Weight= 409.24 N.Type=Flange	
200	210

Weight= 22.50 N.Type=Flange	
250	260

Weight= 22.50 N.Type=Flange

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 19: 6:14

SIF's & TEE's

33	200
----	-----

Node 33 Weldolet	
35	250

Node 35 Weldolet	
------------------	--

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 19: 6:14

RESTRAINTS

10	15
----	----

RESTRAINTS

Node	10	Type	ANC	Dir	Vec=	.000	.000	.000
	55					60		

RESTRAINTS

Node	60	Type	X	MU/YIELD/FORCE =	.30
------	----	------	---	------------------	-----

INTERNA \ Qualquer Usuário

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

Dir Vec= 1.000 .000 .000
 Node 60 Type Y MU/YIELD/FORCE = .30
 Dir Vec= .000 1.000 .000

115

120

RESTRAINTS

Node 120 Type ANC STIF1= 6,000,000 N./cm. Dir Vec=
 .000
 .000 .000

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 19: 6:14

INPUT UNITS USED...

UNITS= SI (m NOM/SCH INPUT= ON

LENGTH	inches	x	25.400	=	mm.
FORCE	pounds	x	4.448	=	N.
MASS (dynamics)	pounds	x	0.454	=	Kg.
MOMENTS (INPUT)	inch-pounds	x	0.113	=	N.m.
MOMENTS (OUTPUT)	inch-pounds	x	0.113	=	N.m.
STRESS	lbs./sq.in.	x	6.895	=	KPa
TEMP. SCALE	degrees F.	x	0.556	=	C
PRESSURE	psig	x	6.895	=	KPa
ELASTIC MODULUS	lbs./sq.in.	x	6.895	=	KPa
PIPE DENSITY	lbs./cu.in.	x	0.028	=	kg./cu.cm.
INSULATION DENS.	lbs./cu.in.	x	0.028	=	kg./cu.cm.
FLUID DENSITY	lbs./cu.in.	x	0.028	=	kg./cu.cm.
TRANSL. STIF	lbs./in.	x	1.751	=	N./cm.
ROTATIONAL STIF	in.lb./deg.	x	0.113	=	N.m./deg
UNIFORM LOAD	lb./in.	x	1.751	=	N./cm.
G LOAD	g's	x	1.000	=	g's
WIND LOAD	lbs./sq.in.	x	6.895	=	KPa
ELEVATION	inches	x	0.025	=	m.
COMPOUND LENGTH	inches	x	25.400	=	mm.
DIAMETER	inches	x	25.400	=	mm.
WALL THICKNESS	inches	x	25.400	=	mm.

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 19: 6:14

SETUP FILE PARAMETERS

CONNECT GEOMETRY THRU CNODES =	YES
MIN ALLOWED BEND ANGLE =	5.00000
MAX ALLOWED BEND ANGLE =	95.0000
BEND LENGTH ATTACHMENT PERCENT =	1.00000
MIN ANGLE TO ADJACENT BEND PT =	5.00000
LOOP CLOSURE TOLERANCE =	25.4000 mm.
THERMAL BOWING HORZ TOLERANCE =	0.100000E-03
AUTO NODE NUMBER INCREMENT=	10.0000
Z AXIS UP=	NO
USE PRESSURE STIFFENING =	DEFAULT

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

ALPHA TOLERANCE =	0.500000E-01	
RESLD-FORCE =	NO	
HGR DEF RESWGT STIF =	0.175127E+13	N./cm.
DECOMP SNG TOL =	0.100000E+11	
BEND AXIAL SHAPE =	YES	
FRICT STIF =	0.175127E+07	N./cm.
FRICT NORM FORCE VAR =	0.150000	
FRICT ANGLE VAR =	15.0000	
FRICT SLIDE MULT =	1.00000	
ROD TOLERANCE =	1.00000	
ROD INC =	2.00000	
INCORE NUMERICAL CHECK =	NO	
OUTCORE NUMERICAL CHECK =	NO	
DEFAULT TRANS RESTRAINT STIFF=	0.175127E+13	N./cm.
DEFAULT ROT RESTRAINT STIFF=	0.112985E+12	N.m./deg
IGNORE SPRING HANGER STIFFNESS =	NO	
MISSING MASS ZPA =	EXTRACTED	
MIN WALL MILL TOLERANCE =	12.5000	
WRC-107 VERSION =	MAR 79 1B1/2B1	
WRC-107 INTERPOLATION =	LAST VALUE	
DEFAULT AMBIENT TEMPERATURE=	21.1111	C
BOURDON PRESSURE=	NONE	
COEFFICIENT OF FRICTION (MU) =	0.000000	
INCLUDE SPRG STIF IN HGR OPE =	NO	
INCLUDE INSULATION IN HYDROTEST =	NO	
REDUCED INTERSECTION =	B31.1 (POST1980)	
USE WRC329	NO	
NO REDUCED SIF FOR RFT AND WLT	NO	
B31.1 REDUCED Z FIX =	YES	
CLASS 1 BRANCH FLEX	NO	
ALL STRESS CASES CORRODED =	NO	
ADD TORSION IN SL STRESS =	DEFAULT	
ADD F/A IN STRESS =	DEFAULT	
OCCASIONAL LOAD FACTOR =	0.000000	
DEFAULT CODE =	B31.3	
B31.3 SUS CASE SIF FACTOR =	0.000000	
ALLOW USERS BEND SIF =	NO	
USE SCHNEIDER	NO	
YIELD CRITERION STRESS =	MAX 3D SHEAR	
USE PD/4T	NO	
BASE HOOP STRESS ON ? =	ID	
EN13480 USE IN OUTPLANE SIFS=	NO	
LIBERAL EXPANSION ALLOWABLE=	YES	
B31.3 SEC 319.2.3C SAXIAL=	Default	
B31.3 WELDING/CONTOUR TEE ISB16.9	FALSE	
PRESSURE VARIATION IN EXP CASE=	DEFAULT	
IMPLEMENT B313 APP-P	NO	
IMPLEMENT B313 CODE CASE 178	YES	
IGNORE B31.1/B31.3 Wc FACTOR=	YES	
USE FRP SIF =	YES	
USE FRP FLEX =	YES	
BS 7159 Pressure Stiffening=	Design Strain	
FRP Property Data File=	CAESAR.FRP	
FRP Emod (axial) =	0.220632E+08	KPa
FRP Ratio Gmod/Emod (axial) =	0.250000	
FRP Ea/Eh*Vh/a =	0.152730	

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

FRP Laminate Type = THREE
 FRP Alpha = 21.6000 C
 FRP Density = 0.166079E-02 kg./cu.cm.
 EXCLUDE f2 FROM UKOOA BENDING = NO

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 19: 6:14

EXECUTION CONTROL PARAMETERS

Rigid/ExpJt Print Flag 1.000
 Bourdon Option000
 Loop Closure Flag 2.000
 Thermal Bowing Delta Temp .. .000 C
 Liberal Allowable Flag 1.000
 Uniform Load Option000

 Ambient Temperature 21.111 C
 Plastic (FRP) Alpha 21.600
 Plastic (FRP) GMOD/EMODa250
 Plastic (FRP) Laminate Type. 3.000
 Eqn Optimizer000
 Node Selection000
 Eqn Ordering000
 Collins000
 Degree Determination000
 User Eqn Control000
 North Direction -Z

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 19: 6:14

COORDINATE REPORT

NODE	X	Y	Z
10	.000	.000	.000
15	.000	120.650	.000
20	.000	700.000	.000
30	.000	700.000	380.000
33	.000	700.000	780.000
35	.000	700.000	1030.000
40	.000	700.000	1555.000
45	.000	700.000	2175.000
50	.000	700.000	2920.000
55	.000	700.000	3640.000
60	.000	700.000	4360.000
70	.000	700.000	5030.000
80	.000	1160.000	5030.000
90	.000	1900.000	5030.000
95	.000	2420.000	5030.000
100	.000	2940.000	5030.000
110	850.000	2940.000	5030.000
112	1589.675	2940.000	5030.000
115	2329.350	2940.000	5030.000

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

120	2450.000	2940.000	5030.000
33	.000	700.000	780.000
200	.000	942.000	780.000
210	.000	1007.088	780.000
35	.000	700.000	1030.000
250	.000	942.000	1030.000
260	.000	1007.088	1030.000

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
15	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
18	-0.000	-0.000	-0.001	0.0000	0.0000	0.0000
19	-0.001	-0.005	0.004	0.0033	-0.0000	0.0002
20	-0.001	-0.029	0.013	0.0059	-0.0001	0.0002
30	-0.001	-0.029	0.013	0.0059	-0.0001	0.0002
33	-0.002	-0.072	0.012	0.0055	-0.0001	0.0003
35	-0.002	-0.096	0.012	0.0048	-0.0000	0.0003
40	-0.002	-0.131	0.012	0.0025	-0.0000	0.0004
45	-0.002	-0.141	0.011	-0.0007	-0.0000	0.0004
50	-0.002	-0.107	0.010	-0.0039	0.0000	0.0005
55	-0.001	-0.046	0.009	-0.0046	0.0001	0.0006
60	-0.000	-0.000	0.008	-0.0011	0.0001	0.0007
68	0.001	-0.003	0.008	0.0007	0.0002	0.0007
69	0.001	-0.022	0.017	0.0046	0.0006	0.0006
70	0.000	-0.031	0.035	0.0023	0.0008	0.0004
80	-0.000	-0.031	0.038	0.0022	0.0009	0.0004
90	-0.005	-0.032	0.060	0.0014	0.0012	0.0002
95	-0.006	-0.033	0.071	0.0010	0.0014	-0.0000
98	-0.006	-0.033	0.073	0.0010	0.0015	-0.0001
99	-0.002	-0.035	0.073	0.0004	0.0018	-0.0012
100	0.000	-0.041	0.064	0.0002	0.0022	-0.0005
110	0.000	-0.043	0.046	0.0001	0.0021	0.0002
112	0.000	-0.031	0.020	0.0001	0.0017	0.0015
115	0.000	-0.006	0.002	0.0000	0.0009	0.0015
120	0.000	-0.003	0.000	0.0000	0.0009	0.0015
200	-0.003	-0.072	0.036	0.0055	-0.0001	0.0003
210	-0.003	-0.072	0.042	0.0055	-0.0001	0.0003
250	-0.003	-0.096	0.032	0.0048	-0.0000	0.0003
260	-0.004	-0.096	0.038	0.0048	-0.0000	0.0003

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
15	-0.000	0.055	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
18	-0.002	0.146	-0.006	-0.0011	0.0004	0.0009
19	-0.025	0.276	0.030	-0.0018	-0.0012	0.0084
20	-0.051	0.320	0.153	0.0050	-0.0011	0.0108
30	-0.052	0.319	0.155	0.0050	-0.0011	0.0109
33	-0.057	0.279	0.337	0.0059	-0.0006	0.0132
35	-0.059	0.252	0.451	0.0061	-0.0003	0.0146
40	-0.059	0.196	0.690	0.0058	0.0003	0.0177
45	-0.053	0.137	0.973	0.0049	0.0008	0.0213
50	-0.039	0.083	1.313	0.0036	0.0013	0.0256
55	-0.021	0.043	1.641	0.0031	0.0016	0.0298
60	-0.000	-0.000	1.969	0.0044	0.0017	0.0339
68	0.007	-0.028	2.101	0.0042	0.0021	0.0356
69	-0.043	0.030	2.215	-0.0123	0.0073	0.0359
70	-0.198	0.192	2.150	-0.0355	0.0100	0.0365
80	-0.249	0.228	2.100	-0.0362	0.0107	0.0366
90	-0.716	0.565	1.596	-0.0401	0.0167	0.0341
95	-1.010	0.802	1.228	-0.0396	0.0210	0.0294
98	-1.080	0.866	1.131	-0.0390	0.0221	0.0277
99	-1.092	1.003	0.923	-0.0306	0.0223	-0.0028
100	-0.944	0.970	0.755	-0.0272	0.0248	-0.0288
110	-0.729	0.715	0.546	-0.0219	0.0249	-0.0311
112	-0.390	0.320	0.241	-0.0136	0.0206	-0.0271
115	-0.052	0.035	0.027	-0.0053	0.0109	-0.0144
120	0.004	0.005	0.004	-0.0052	0.0108	-0.0143
200	-0.113	0.390	0.362	0.0059	-0.0006	0.0132
210	-0.128	0.420	0.368	0.0059	-0.0006	0.0132
250	-0.121	0.363	0.477	0.0061	-0.0003	0.0146
260	-0.138	0.393	0.483	0.0061	-0.0003	0.0146

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

Output disabled for field "DX"

Output disabled for field "DY"

Output disabled for field "DZ"

Output disabled for field "RX"

Output disabled for field "RY"

Output disabled for field "RZ"

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
15	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
18	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
19	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
20	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
33	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
35	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
40	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
45	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
55	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
68	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
69	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
70	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
80	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
90	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
95	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
98	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
99	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
100	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
110	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
112	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
115	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
120	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
200	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
210	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
250	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
260	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
15	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
18	-0.000	-0.000	-0.001	0.0000	0.0000	0.0000
19	-0.000	-0.002	0.002	0.0018	-0.0000	0.0001
20	-0.001	-0.016	0.007	0.0032	-0.0000	0.0001
30	-0.001	-0.016	0.007	0.0032	-0.0000	0.0001
33	-0.001	-0.039	0.007	0.0030	-0.0000	0.0002
35	-0.001	-0.052	0.007	0.0026	-0.0000	0.0002
40	-0.001	-0.071	0.006	0.0013	-0.0000	0.0002
45	-0.001	-0.076	0.006	-0.0004	-0.0000	0.0002
50	-0.001	-0.058	0.005	-0.0021	0.0000	0.0003
55	-0.001	-0.025	0.005	-0.0025	0.0000	0.0003
60	-0.000	-0.000	0.005	-0.0006	0.0001	0.0004
68	0.000	-0.002	0.005	0.0004	0.0001	0.0004
69	0.001	-0.012	0.009	0.0025	0.0003	0.0003
70	0.000	-0.016	0.019	0.0012	0.0004	0.0002
80	-0.000	-0.016	0.020	0.0012	0.0005	0.0002
90	-0.003	-0.017	0.032	0.0007	0.0006	0.0001
95	-0.003	-0.017	0.038	0.0006	0.0008	-0.0000
98	-0.003	-0.017	0.039	0.0005	0.0008	-0.0001
99	-0.001	-0.019	0.039	0.0002	0.0010	-0.0007
100	0.000	-0.022	0.034	0.0001	0.0012	-0.0003
110	0.000	-0.023	0.024	0.0001	0.0011	0.0001
112	0.000	-0.017	0.011	0.0000	0.0009	0.0008
115	0.000	-0.004	0.001	0.0000	0.0005	0.0008
120	0.000	-0.002	0.000	0.0000	0.0005	0.0008
200	-0.002	-0.039	0.019	0.0030	-0.0000	0.0002
210	-0.002	-0.039	0.023	0.0030	-0.0000	0.0002
250	-0.002	-0.052	0.018	0.0026	-0.0000	0.0002
260	-0.002	-0.052	0.021	0.0026	-0.0000	0.0002

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
15	-0.000	0.055	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
18	-0.002	0.146	-0.005	-0.0011	0.0004	0.0009
19	-0.025	0.278	0.027	-0.0035	-0.0011	0.0084
20	-0.051	0.335	0.146	0.0018	-0.0011	0.0107
30	-0.051	0.335	0.148	0.0018	-0.0011	0.0107
33	-0.057	0.318	0.330	0.0029	-0.0006	0.0130
35	-0.058	0.304	0.444	0.0035	-0.0003	0.0145
40	-0.058	0.267	0.684	0.0045	0.0003	0.0175
45	-0.052	0.213	0.967	0.0053	0.0008	0.0210
50	-0.038	0.140	1.307	0.0058	0.0013	0.0253
55	-0.020	0.068	1.636	0.0056	0.0015	0.0294
60	-0.000	-0.000	1.965	0.0050	0.0016	0.0336
68	0.007	-0.027	2.097	0.0039	0.0020	0.0352
69	-0.043	0.042	2.206	-0.0147	0.0070	0.0356
70	-0.198	0.208	2.132	-0.0367	0.0096	0.0363
80	-0.248	0.244	2.080	-0.0374	0.0102	0.0364
90	-0.714	0.582	1.564	-0.0409	0.0161	0.0340
95	-1.007	0.820	1.190	-0.0402	0.0202	0.0294
98	-1.077	0.883	1.092	-0.0396	0.0213	0.0277
99	-1.091	1.022	0.884	-0.0308	0.0213	-0.0022
100	-0.944	0.991	0.721	-0.0273	0.0236	-0.0286
110	-0.729	0.738	0.522	-0.0220	0.0237	-0.0312
112	-0.391	0.337	0.231	-0.0136	0.0197	-0.0279
115	-0.052	0.039	0.026	-0.0053	0.0104	-0.0153
120	0.004	0.007	0.004	-0.0052	0.0103	-0.0151
200	-0.112	0.430	0.342	0.0029	-0.0006	0.0130
210	-0.126	0.460	0.346	0.0029	-0.0006	0.0130
250	-0.119	0.416	0.459	0.0035	-0.0003	0.0145
260	-0.136	0.445	0.463	0.0035	-0.0003	0.0145

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

LOAD CASE DEFINITION KEY

CASE 1 (HYD) WW+HP

CASE 2 (OPE) W+T1+P1

CASE 4 (SUS) W+P1

CASE 5 (EXP) L5=L2-L4

Node	Load Case	FX N.	FY N.	FZ N.	MX N.m.	MY N.m.	MZ N.m.
10		TYPE=Rigid ANC;					
	1(HYD)	-4	-3046	-1682	-356	3	23
	2(OPE)	77	-2054	-5115	-2369	346	984
	4(SUS)	-2	-1809	-916	-194	2	12
	5(EXP)	79	-245	-4199	-2175	344	971
	MAX	79/L5	-3046/L1	-5115/L2	-2369/L2	346/L2	984/L2
60		TYPE=Rigid X; Rigid Y;					
	1(HYD)	-85	-6554	1510	0	0	0
	2(OPE)	-2241	-7169	2823	0	0	0
	4(SUS)	-46	-3507	824	0	0	0
	5(EXP)	-2195	-3662	1999	0	0	0
	MAX	-2241/L2	-7169/L2	2823/L2			
120		TYPE=Flex ANC;					
	1(HYD)	89	-1820	172	13	342	591
	2(OPE)	2164	2780	2298	-2014	4169	-5540
	4(SUS)	48	-1127	91	7	182	318
	5(EXP)	2116	3907	2206	-2020	3987	-5858
	MAX	2164/L2	3907/L5	2298/L2	-2020/L5	4169/L2	-5858/L5

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

LOAD CASE DEFINITION KEY

CASE 1 (HYD) WW+HP
 CASE 2 (OPE) W+T1+P1
 CASE 3 (Alt-SUS) W+P1
 CASE 4 (SUS) W+P1
 CASE 5 (EXP) L5=L2-L4

Note: This report indicates generic stresses summary. Currently, CAESAR II does not have summary for code-defined stresses.

Piping Code: B31.3 = B31.3 -2016, Jan 31, 2017

CODE STRESS CHECK PASSED : LOADCASE 1 (HYD) WW+HP

Highest Stresses: (	KPa	)	LOADCASE 1 (HYD) WW+HP	
Ratio (%):	23.0	@Node	60	
Code Stress:	55454.7	Allowable Stress:	241316.5	
Axial Stress:	51312.4	@Node	100	
Bending Stress:	4390.7	@Node	68	
Torsion Stress:	82.6	@Node	70	
Hoop Stress:	106270.8	@Node	18	
Max Stress Intensity:	117648.8	@Node	70	

NO CODE STRESS CHECK PROCESSED: LOADCASE 2 (OPE) W+T1+P1

Highest Stresses: (	KPa	)	LOADCASE 2 (OPE) W+T1+P1	
Ratio (%):	0.0	@Node	99	
OPE Stress:	49364.8	Allowable Stress:	0.0	
Axial Stress:	34011.2	@Node	18	
Bending Stress:	15415.2	@Node	98	
Torsion Stress:	2194.3	@Node	99	
Hoop Stress:	70847.2	@Node	18	
Max Stress Intensity:	78594.9	@Node	99	

CODE STRESS CHECK PASSED : LOADCASE 3 (Alt-SUS) W+P1

Highest Stresses: (	KPa	)	LOADCASE 3 (Alt-SUS) W+P1	
Ratio (%):	26.4	@Node	60	
Code Stress:	36443.2	Allowable Stress:	137895.1	
Axial Stress:	34209.3	@Node	100	
Bending Stress:	2667.0	@Node	35	
Torsion Stress:	47.0	@Node	70	
Hoop Stress:	70847.2	@Node	18	
Max Stress Intensity:	78432.5	@Node	70	

CODE STRESS CHECK PASSED : LOADCASE 4 (SUS) W+P1

Highest Stresses: (	KPa	)	LOADCASE 4 (SUS) W+P1	
Ratio (%):	26.4	@Node	60	
Code Stress:	36427.5	Allowable Stress:	137895.1	
Axial Stress:	34209.8	@Node	100	
Bending Stress:	2353.7	@Node	68	
Torsion Stress:	44.1	@Node	70	
Hoop Stress:	70847.2	@Node	18	

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

Max Stress Intensity: 78432.5 @Node 70

CODE STRESS CHECK PASSED : LOADCASE 5 (EXP) L5=L2-L4

Highest Stresses: (KPa)	LOADCASE 5 (EXP) L5=L2-L4	
Ratio (%):	5.2 @Node 99	
Code Stress:	16234.4	Allowable Stress: 310447.2
Axial Stress:	579.0 @Node 69	
Bending Stress:	15099.8 @Node 98	
Torsion Stress:	2183.2 @Node 99	
Hoop Stress:	0.0 @Node 15	
Max Stress Intensity:	16234.4 @Node 99	

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
Job: C:\USERS\UPR1\ONEDRIVE - PETROBRAS\DOCUMENTS\7 - CURSOS E TREINAMENTOS\2
Licensed To: Licensed To: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

RELATÓRIO DE ANÁLISE MODAL

Table of Contents

NATURAL FREQUENCY REPORT (- N/A -)	113
NATURAL FREQUENCY REPORT (- N/A -)	114

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job: C:\USERS\UPR1\ONEDRIVE - PETROBRAS\DOCUMENTS\7 - CURSOS E TREINAMENTOS\2
 Licensed To: Licensed To: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

MODE	(Hz) FREQUENCY	(Radians/Sec) FREQUENCY	(Sec) PERIOD
------	-------------------	----------------------------	-----------------

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date:DEC 15,2022 @19:30
 Pg: 113

1	29.998	188.484	0.033
2	42.235	265.372	0.024
3	44.262	278.105	0.023
4	81.469	511.886	0.012
5	96.696	607.556	0.010
6	101.467	637.534	0.010
7	122.227	767.978	0.008

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 19:6
 Job: C:\USERS\UPR1\ONEDRIVE - PETROBRAS\DOCUMENTS\7 - CURSOS E TREINAMENTOS\2
 Licensed To: Licensed To: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

MODE	(Hz) FREQUENCY	(Radians/Sec) FREQUENCY	(Sec) PERIOD
------	-------------------	----------------------------	-----------------

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date:DEC 15,2022 @19:30
 Pg: 114

1	29.998	188.484	0.033
2	42.235	265.372	0.024
3	44.262	278.105	0.023
4	81.469	511.886	0.012
5	96.696	607.556	0.010
6	101.467	637.534	0.010
7	122.227	767.978	0.008

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

RELATÓRIO DE ANÁLISE HARMÔNICA

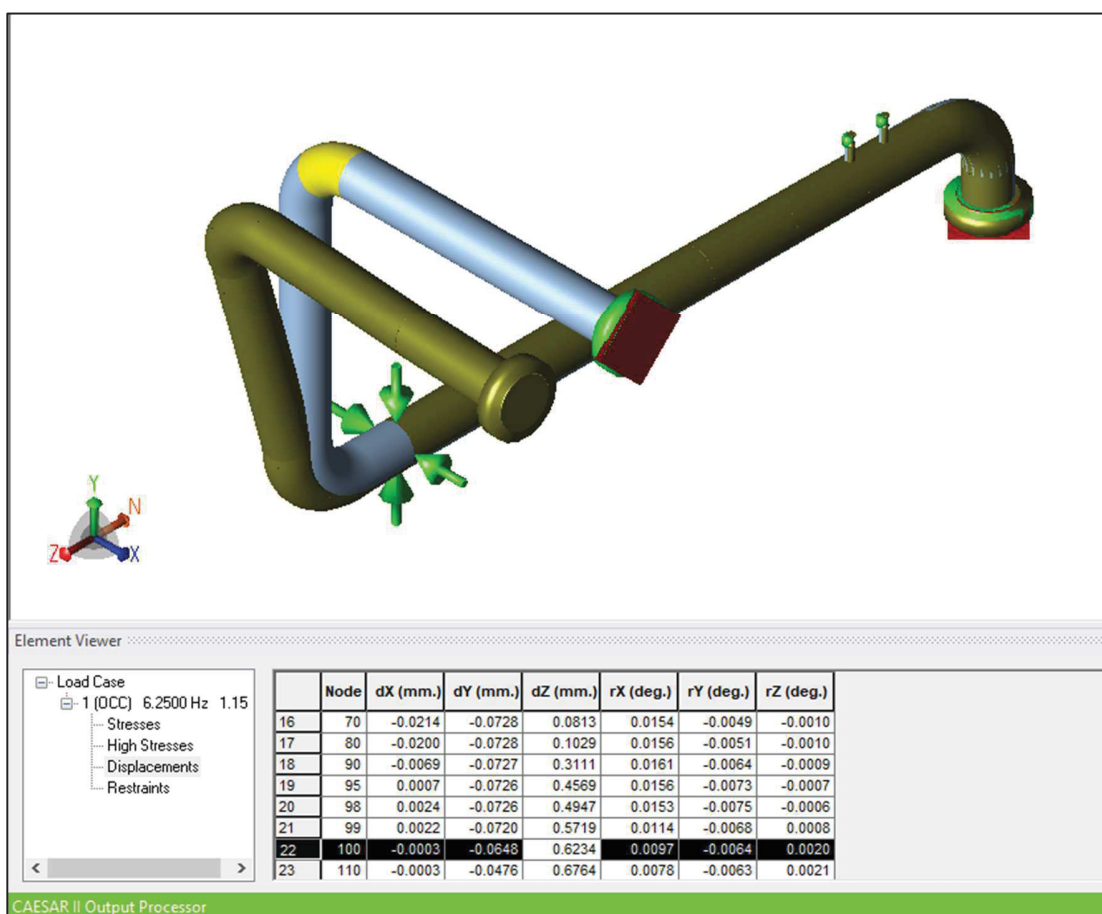
Table of Contents

LISTING OF DYNAMIC LOAD CASES FOR THIS ANALYSIS.....	116
INPUT LISTING.....	117
Displacements : 1 (OCC) 6.2500 Hz 1.15 Ø.....	126

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

LISTING OF DYNAMIC LOAD CASES FOR THIS ANALYSIS

1 (OCC) 6.2500 Hz 1.15 Ø



Print da Tela do CAESAR II® v. 11 (2019)

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

INPUT LISTING

Job Description:

PROJECT: ANALISE DE VIBRACAO EM TUBULACAO DE PROCESSO

CLIENT : UNISANTA - MESTRADO

ANALYST: JOSE JEFFERSON MORAIS DE OLIVEIRA

NOTES :

- 1 - Sistema de Tubulacao de Planta de Compressao;
- 2 - Compressor do Alternativo (Pistao);
- 3 - Rotacao do Compressor: 375 RPM;
- 4 - Linha de succao do segundo estagio;
- 5 - Modelo Final Ajustado para Simulacao.

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15, 2022 20:38:40

PIPE DATA

From 10 To 15 DY= 120.650 mm.

PIPE

Dia= 273.050 mm. Wall= 9.000 mm. Element Name= FLANGE_FLG_300

GENERAL

T1= 60 C P1= 5,000.0000 KPa Mat= (106)A106 Grade B E= 203,395,328 KPa
 EH1= 200,637,424 KPa EH2= 203,395,328 KPa EH3= 203,395,328 KPa
 EH4= 203,395,328 KPa EH5= 203,395,328 KPa EH6= 203,395,328 KPa
 EH7= 203,395,328 KPa EH8= 203,395,328 KPa EH9= 203,395,328 KPa
 v = .292 Pipe Den= .0078334 kg./cu.cm. Insul Thk= .000 mm.

RIGID Weight= 409.24 N.

RESTRAINTS

Node 10 ANC

ALLOWABLE STRESSES

B31.3 (2016) Cycle Max Switch = --- Sc= 137,895 KPa
 Sh1= 137,895 KPa Sh2= 137,895 KPa Sh3= 137,895 KPa Sh4= 137,895 KPa
 Sh5= 137,895 KPa Sh6= 137,895 KPa Sh7= 137,895 KPa Sh8= 137,895 KPa
 Sh9= 137,895 KPa Sy= 241,316 KPa

From 15 To 20 DY= 579.350 mm.

GENERAL

P1= 5,000.0000 KPa PHyd= 7,500.0000 KPa

BEND at "TO" end

Radius= 381.000 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 19
 Angle/Node @2= .00 18

From 20 To 30 DZ= 380.000 mm.

From 30 To 33 DZ= 400.000 mm.

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

INPUT LISTING

 From 33 To 35 DZ= 250.000 mm.

From 35 To 40 DZ= 525.000 mm.

From 40 To 45 DZ= 620.000 mm.

From 45 To 50 DZ= 745.000 mm.

From 50 To 55 DZ= 720.000 mm.

From 55 To 60 DZ= 720.000 mm.

RESTRAINTS

Node 60 X Mu = .30

Node 60 Y Mu = .30

From 60 To 70 DZ= 670.000 mm.

BEND at "TO" end

Radius= 381.000 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 69

Angle/Node @2= .00 68

From 70 To 80 DY= 460.000 mm.

From 80 To 90 DY= 740.000 mm.

From 90 To 95 DY= 520.000 mm.

From 95 To 100 DY= 520.000 mm.

BEND at "TO" end

Radius= 381.000 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 99

Angle/Node @2= .00 98

From 100 To 110 DX= 850.000 mm.

From 110 To 112 DX= 739.675 mm.

From 112 To 115 DX= 739.675 mm.

From 115 To 120 DX= 120.650 mm.

Element Name= FLANGE_FLG_300

RIGID Weight= 409.24 N.

RESTRAINTS

Node 120 ANC K= 6,000,000 N./cm. Kr= 6,000,000 N.m./deg

From 33 To 200 DY= 242.000 mm.

PIPE

Dia= 33.401 mm. Wall= 6.350 mm.

Insul Thk= .000 mm.

SIF's & TEE's

Node 33 Weldolet

From 200 To 210 DY= 65.088 mm.

Element Name= FLANGE_FLG_300

RIGID Weight= 22.50 N.

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

INPUT LISTING

From 35 To 250 DY= 242.000 mm.

PIPE

Dia= 33.401 mm. Wall= 6.350 mm.

Insul Thk= .000 mm.

SIF's & TEE's

Node 35 Weldolet

 From 250 To 260 DY= 65.088 mm.

Element Name= FLANGE_FLG_300

RIGID Weight= 22.50 N.

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 20:38:40

MATERIAL Changes:

10

15

Mat= (106)A106 Grade B E= 203,395,328 KPa v = .292

Density= .0078 kg./cu.cm.

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 20:38:40

JOBNAME: C:\USERS\UPR1\ONEDRIVE - PETROBRAS\DOCUMENTS\7 - CURSOS E TREINAMENTOS

ALLOWABLE STRESS Changes

10

15

B31.3 (2016) Cycle Max Switch = --- Sc= 137,895 KPa

Sh1= 137,895 KPa Sh2= 137,895 KPa Sh3= 137,895 KPa Sh4= 137,895 KPa

Sh5= 137,895 KPa Sh6= 137,895 KPa Sh7= 137,895 KPa Sh8= 137,895 KPa

Sh9= 137,895 KPa Sy= 241,316 KPa

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 20:38:40

BEND ELEMENTS

15

20

Radius= 381.000 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 19

Angle/Node @2= .00 18

60

70

Radius= 381.000 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 69

Angle/Node @2= .00 68

95

100

Radius= 381.000 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 99

Angle/Node @2= .00 98

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

INPUT LISTING

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15, 2022 20:38:40

RIGIDS

10 15

Weight= 409.24 N.Type=Flange
 115

120

Weight= 409.24 N.Type=Flange
 200

210

Weight= 22.50 N.Type=Flange
 250

260

Weight= 22.50 N.Type=Flange

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15, 2022 20:38:40

SIF's & TEE's

33 200

Node 33 Weldolet
 35

250

Node 35 Weldolet

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15, 2022 20:38:40

RESTRAINTS

10 15

RESTRAINTS

Node 10 Type ANC Dir Vec= .000 .000 .000

55 60

RESTRAINTS

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

INPUT LISTING

```

Node      60  Type  X      MU/YIELD/FORCE =      .30
Dir Vec=   1.000      .000      .000
Node      60  Type  Y      MU/YIELD/FORCE =      .30
Dir Vec=   .000      1.000      .000

```

115

120

RESTRAINTS

```

Node      120  Type  ANC      STIF1= 6,000,000 N./cm.      Dir Vec=      .000
.000      .000

```

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 20:38:40

INPUT UNITS USED...

```

UNITS=      SI (m NOM/SCH INPUT= ON
LENGTH      inches      x      25.400      =      mm.
FORCE      pounds      x      4.448      =      N.
MASS (dynamics)      pounds      x      0.454      =      Kg.
MOMENTS (INPUT)      inch-pounds      x      0.113      =      N.m.
MOMENTS (OUTPUT)      inch-pounds      x      0.113      =      N.m.
STRESS      lbs./sq.in.      x      6.895      =      KPa
TEMP. SCALE      degrees F.      x      0.556      =      C
PRESSURE      psig      x      6.895      =      KPa
ELASTIC MODULUS      lbs./sq.in.      x      6.895      =      KPa
PIPE DENSITY      lbs./cu.in.      x      0.028      =      kg./cu.cm.
INSULATION DENS.      lbs./cu.in.      x      0.028      =      kg./cu.cm.
FLUID DENSITY      lbs./cu.in.      x      0.028      =      kg./cu.cm.
TRANSL. STIF      lbs./in.      x      1.751      =      N./cm.
ROTATIONAL STIF      in.lb./deg.      x      0.113      =      N.m./deg
UNIFORM LOAD      lb./in.      x      1.751      =      N./cm.
G LOAD      g's      x      1.000      =      g's
WIND LOAD      lbs./sq.in.      x      6.895      =      KPa
ELEVATION      inches      x      0.025      =      m.
COMPOUND LENGTH      inches      x      25.400      =      mm.
DIAMETER      inches      x      25.400      =      mm.
WALL THICKNESS      inches      x      25.400      =      mm.

```

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 20:38:40

SETUP FILE PARAMETERS

```

-----
CONNECT GEOMETRY THRU CNODES =      YES
MIN ALLOWED BEND ANGLE =      5.00000
MAX ALLOWED BEND ANGLE =      95.0000
BEND LENGTH ATTACHMENT PERCENT =      1.00000
MIN ANGLE TO ADJACENT BEND PT =      5.00000
LOOP CLOSURE TOLERANCE =      25.4000      mm.
THERMAL BOWING HORZ TOLERANCE =      0.100000E-03

```

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

INPUT LISTING

```

AUTO NODE NUMBER INCREMENT=      10.0000
Z AXIS UP=                        NO
USE PRESSURE STIFFENING =          DEFAULT
ALPHA TOLERANCE =                  0.500000E-01
RESLD-FORCE =                      NO
HGR DEF RESWGT STIF =              0.175127E+13 N./cm.
DECOMP SNG TOL =                   0.100000E+11
BEND AXIAL SHAPE =                 YES
FRICT STIF =                       0.175127E+07 N./cm.
FRICT NORM FORCE VAR =              0.150000
FRICT ANGLE VAR =                  15.0000
FRICT SLIDE MULT =                 1.00000
ROD TOLERANCE =                    1.00000
ROD INC =                          2.00000
INCORE NUMERICAL CHECK =           NO
OUTCORE NUMERICAL CHECK =          NO
DEFAULT TRANS RESTRAINT STIFF=     0.175127E+13 N./cm.
DEFAULT ROT RESTRAINT STIFF=       0.112985E+12 N.m./deg
IGNORE SPRING HANGER STIFFNESS =   NO
MISSING MASS ZPA =                 EXTRACTED
MIN WALL MILL TOLERANCE =          12.5000
WRC-107 VERSION =                  MAR 79 1B1/2B1
WRC-107 INTERPOLATION =            LAST VALUE
DEFAULT AMBIENT TEMPERATURE=       21.1111 C
BOURDON PRESSURE=                  NONE
COEFFICIENT OF FRICTION (MU) =     0.000000
INCLUDE SPRG STIF IN HGR OPE =     NO
INCLUDE INSULATION IN HYDROTEST =  NO
REDUCED INTERSECTION =             B31.1 (POST1980)
USE WRC329                         NO
NO REDUCED SIF FOR RFT AND WLT     NO
B31.1 REDUCED Z FIX =              YES
CLASS 1 BRANCH FLEX                NO
ALL STRESS CASES CORRODED =        NO
ADD TORSION IN SL STRESS =         DEFAULT
ADD F/A IN STRESS =                DEFAULT
OCCASIONAL LOAD FACTOR =           0.000000
DEFAULT CODE =                     B31.3
B31.3 SUS CASE SIF FACTOR =        0.000000
ALLOW USERS BEND SIF =             NO
USE SCHNEIDER                      NO
YIELD CRITERION STRESS =           MAX 3D SHEAR
USE PD/4T                          NO
BASE HOOP STRESS ON ? =            ID
EN13480 USE IN OUTPLANE SIFS=      NO
LIBERAL EXPANSION ALLOWABLE=       YES
B31.3 SEC 319.2.3C SAXIAL=         Default
B31.3 WELDING/CONTOUR TEE ISB16.9 FALSE
PRESSURE VARIATION IN EXP CASE=    DEFAULT
IMPLEMENT B313 APP-P               NO
IMPLEMENT B313 CODE CASE 178      YES
IGNORE B31.1/B31.3 Wc FACTOR=     YES
USE FRP SIF =                      YES
USE FRP FLEX =                     YES
BS 7159 Pressure Stiffening=       Design Strain

```

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

INPUT LISTING

```
FRP Property Data File=          CAESAR.FRP
FRP Emod (axial) =              0.220632E+08      KPa
FRP Ratio Gmod/Emod (axial) =    0.250000
FRP Ea/Eh*Vh/a =                0.152730
FRP Laminate Type =             THREE
FRP Alpha =                     21.6000              C
FRP Density =                   0.166079E-02 kg./cu.cm.
EXCLUDE f2 FROM UKOOA BENDING = NO
```

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 20:38:40

EXECUTION CONTROL PARAMETERS

```
Rigid/ExpJt Print Flag ..... 1.000
Bourdon Option ..... .000
Loop Closure Flag ..... 2.000
Thermal Bowing Delta Temp .. .000 C
Liberal Allowable Flag ..... 1.000
Uniform Load Option ..... .000

Ambient Temperature ..... 21.111 C
Plastic (FRP) Alpha ..... 21.600
Plastic (FRP) GMOD/EMODa ... .250
Plastic (FRP) Laminate Type. 3.000
Eqn Optimizer ..... .000
Node Selection ..... .000
Eqn Ordering ..... .000
Collins ..... .000
Degree Determination ..... .000
User Eqn Control ..... .000
North Direction ..... -Z
```

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) DEC 15,2022 20:38:40

COORDINATE REPORT

```
/----- (mm.) -----/
NODE      X      Y      Z
10      .000    .000    .000
15      .000   120.650    .000
20      .000   700.000    .000
30      .000   700.000   380.000
33      .000   700.000   780.000
35      .000   700.000  1030.000
40      .000   700.000  1555.000
45      .000   700.000  2175.000
50      .000   700.000  2920.000
55      .000   700.000  3640.000
60      .000   700.000  4360.000
70      .000   700.000  5030.000
80      .000  1160.000  5030.000
90      .000  1900.000  5030.000
95      .000  2420.000  5030.000
```

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

INPUT LISTING

100	.000	2940.000	5030.000
110	850.000	2940.000	5030.000
112	1589.675	2940.000	5030.000
115	2329.350	2940.000	5030.000
120	2450.000	2940.000	5030.000
33	.000	700.000	780.000
200	.000	942.000	780.000
210	.000	1007.088	780.000
35	.000	700.000	1030.000
250	.000	942.000	1030.000
260	.000	1007.088	1030.000

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date:DEC 15,2022 @20:38
 Pg: 124

```

----- DYNAMIC ANALYSIS INPUT DATA
H          <----- Analysis Type (HARMONIC/SPECTRUM/MODES/TIMEHISTORY)
2          <----- Static Load Case for Nonlinear Restraint Status
0.0        <----- Stiffness Factor for Friction (0.0-Not Used)
0.01       <----- Damping (DSRSS) (ratio of critical)
CONSISTENT <----- Mass Model (LUMPED/CONSISTENT)
LUMPED MASSES
*EXAMPLE --> 1375.6 ALL 15 ...ADD MASS OF 1375.6 AT NODE 15
*EXAMPLE --> 0.0 ALL 105 .....DELETE ALL MASS FROM NODE 105
*EXAMPLE --> 0.0 ALL 5 15 5 ..DELETE ALL MASS FROM 5, 10 AND 15
SNUBBERS
*EXAMPLE --> 10000 X 50 .....SNUBBER AT NODE 50 STIFFNESS=10000
*EXAMPLE --> 1E13 (1,0,1) 75 .SKEWED 45 DEG. SNUBBER AT 75
*EXAMPLE --> 1E13 Z 55 155 ...Z SNUBBER AT 55, CONNECTING NODE 155
EXCITATION FREQUENCIES FOR HARMONIC ANALYSIS
*FREQUENCIA DE EXCITACAO DO COMPRESSOR: 29 ~31 HZ
6.25 , 0 , 0 ,
HARMONIC FORCES
*0 , -->,1567.3,X , 0 , 50 , 0 , 0
HARMONIC DISPLACEMENTS
*0 , DO,FLANGE,DO , 0 , 0 , 0 , 0
0.150000 , Z , 0 , 120 , ,
FORCE SPECTRUM EDITING
*EXAMPLE --> 832.9 X 50 2 ..832.9 LOAD AT 50 IN X, SET #2.
DYNAMIC LOAD CASE DATA
DYNAMIC LOAD CASE # 1

STRESSTYPE(OCC)
STATIC/DYNAMIC COMBINATION CASES
SPECTRUM DEFINITIONS
*NOTE THAT: ELCENTRO THRU UBCSOIL3 ARE RESERVED SPECTRUM NAMES
*THAT CAN BE USED WITHOUT FURTHER DEFINITION!

ELCENTRO , FREQ , DISPL , LOG , LOG

*BASED ON MAY 18, 1940 EL CENTRO CALIFORNIA EARTHQUAKE
*N-S COMPONENT. APPLIES TO ELASTIC SYSTEMS WITH 5-10% DAMPING.
*TAKEN FROM BIGGS, "INTRODUCTION TO STRUCTURAL DYNAMICS".

```

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

INPUT LISTING

1.60H.5 , FREQ , VEL , LOG , LOG

*AEC REG. GUIDE 1.60 REV.1, DEC.1973 HORIZONTAL DESIGN RESPONSE
 *SPECTRA FOR 0.5% CRITICALLY DAMPED SYSTEM.

1.60H2 , FREQ , VEL , LOG , LOG
 1.60H5 , FREQ , VEL , LOG , LOG
 1.60H7 , FREQ , VEL , LOG , LOG
 1.60H10 , FREQ , VEL , LOG , LOG
 1.60V.5 , FREQ , VEL , LOG , LOG
 1.60V2 , FREQ , VEL , LOG , LOG
 1.60V5 , FREQ , VEL , LOG , LOG
 1.60V7 , FREQ , VEL , LOG , LOG
 1.60V10 , FREQ , VEL , LOG , LOG

*UNIFORM BUILDING CODE NORMALIZED RESPONSE SPECTRA
 *SOIL TYPE 1 (ROCK AND STIFF SOIL)
 *SOIL TYPE 2 (DEEP COHESIONLESS OR STIFF CLAY SOILS)
 *SOIL TYPE 3 (SOFT TO MEDIUM CLAYS AND SANDS)

UBCSOIL1 , PER , ACC , LIN , LIN
 UBCSOIL2 , PER , ACC , LIN , LIN
 UBCSOIL3 , PER , ACC , LIN , LIN
 1.60V5 , FREQ , VEL , LOG , LOG
 1.60V7 , FREQ , VEL , LOG , LOG
 1.60V10 , FREQ , VEL , LOG , LOG

*UNIFORM BUILDING CODE NORMALIZED RESPONSE SPECTRA
 *SOIL TYPE 1 (ROCK AND STIFF SOIL)
 *SOIL TYPE 2 (DEEP COHESIONLESS OR STIFF CLAY SOILS)
 *SOIL TYPE 3 (SOFT TO MEDIUM CLAYS AND SANDS)

UBCSOIL1 , PER , ACC , LIN , LIN
 UBCSOIL2 , PER , ACC , LIN , LIN
 UBCSOIL3 , PER , ACC , LIN , LIN

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 1 (OCC) 6.2500 Hz 1.15 Ø

HARMONIC DISPLACEMENTS

Displacement (mm): 0,1500 / Direction: Z

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
15	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
18	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
19	0.000	-0.000	0.000	0.0000	0.0001	-0.0001
20	0.001	0.000	0.000	-0.0002	0.0001	-0.0002
30	0.001	0.000	0.000	-0.0002	0.0001	-0.0002
33	0.002	0.002	0.000	-0.0002	0.0001	-0.0002
35	0.002	0.003	0.000	-0.0002	0.0001	-0.0002
40	0.003	0.005	0.000	-0.0002	0.0001	-0.0002
45	0.004	0.006	0.000	-0.0001	0.0000	-0.0003
50	0.004	0.007	0.001	0.0000	-0.0000	-0.0003
55	0.003	0.005	0.001	0.0003	-0.0001	-0.0004
60	0.000	0.000	0.001	0.0006	-0.0003	-0.0004
68	-0.002	-0.003	0.001	0.0007	-0.0003	-0.0004
69	-0.003	-0.009	0.004	0.0019	-0.0008	-0.0003
70	-0.004	-0.013	0.015	0.0029	-0.0009	-0.0002
80	-0.004	-0.013	0.019	0.0029	-0.0009	-0.0002
90	-0.001	-0.013	0.058	0.0030	-0.0012	-0.0002
95	0.000	-0.013	0.085	0.0029	-0.0013	-0.0001
98	0.000	-0.013	0.092	0.0028	-0.0014	-0.0001
99	0.000	-0.013	0.106	0.0021	-0.0013	0.0001
100	-0.000	-0.012	0.115	0.0018	-0.0012	0.0004
110	-0.000	-0.009	0.125	0.0014	-0.0012	0.0004
112	-0.000	-0.004	0.139	0.0009	-0.0009	0.0003
115	-0.000	-0.000	0.149	0.0003	-0.0005	0.0002
120	-0.000	-0.000	0.150	0.0003	-0.0005	0.0002
200	0.003	0.002	-0.001	-0.0002	0.0001	-0.0002
210	0.003	0.002	-0.001	-0.0002	0.0001	-0.0002
250	0.003	0.003	-0.001	-0.0002	0.0001	-0.0002
260	0.004	0.003	-0.001	-0.0002	0.0001	-0.0002

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 1 (OCC) 6.2500 Hz 1.15 Ø

HARMONIC DISPLACEMENTS

Displacement (mm): 0,1614 / Direction: Z

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
15	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
18	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
19	0.000	-0.000	0.000	0.0000	0.0001	-0.0001
20	0.001	0.000	0.000	-0.0002	0.0001	-0.0002
30	0.001	0.000	0.000	-0.0002	0.0001	-0.0002
33	0.002	0.002	0.000	-0.0002	0.0001	-0.0002
35	0.003	0.003	0.000	-0.0002	0.0001	-0.0002
40	0.003	0.005	0.000	-0.0002	0.0001	-0.0003
45	0.004	0.007	0.001	-0.0001	0.0000	-0.0003
50	0.004	0.008	0.001	0.0001	-0.0001	-0.0003
55	0.003	0.006	0.001	0.0003	-0.0002	-0.0004
60	0.000	0.000	0.001	0.0006	-0.0003	-0.0004
68	-0.002	-0.003	0.001	0.0008	-0.0004	-0.0004
69	-0.004	-0.010	0.004	0.0020	-0.0008	-0.0003
70	-0.004	-0.015	0.016	0.0031	-0.0010	-0.0002
80	-0.004	-0.015	0.020	0.0031	-0.0010	-0.0002
90	-0.001	-0.014	0.062	0.0032	-0.0013	-0.0002
95	0.000	-0.014	0.091	0.0031	-0.0014	-0.0001
98	0.000	-0.014	0.099	0.0031	-0.0015	-0.0001
99	0.000	-0.014	0.114	0.0023	-0.0014	0.0002
100	-0.000	-0.013	0.124	0.0019	-0.0013	0.0004
110	-0.000	-0.009	0.135	0.0016	-0.0012	0.0004
112	-0.000	-0.004	0.150	0.0010	-0.0010	0.0004
115	-0.000	-0.000	0.160	0.0004	-0.0005	0.0002
120	-0.000	-0.000	0.161	0.0004	-0.0005	0.0002
200	0.003	0.002	-0.001	-0.0002	0.0001	-0.0002
210	0.003	0.002	-0.001	-0.0002	0.0001	-0.0002
250	0.004	0.003	-0.001	-0.0002	0.0001	-0.0002
260	0.004	0.003	-0.001	-0.0002	0.0001	-0.0002

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements
 CASE 1 (OCC) 6.2500 Hz 1.15 Ø

HARMONIC DISPLACEMENTS

Displacement (mm): 0,2059 / Direction: Z

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
15	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
18	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
19	0.001	-0.000	0.001	0.0000	0.0001	-0.0002
20	0.002	0.000	0.000	-0.0003	0.0001	-0.0002
30	0.002	0.000	0.000	-0.0003	0.0001	-0.0002
33	0.003	0.002	0.001	-0.0003	0.0001	-0.0003
35	0.003	0.004	0.001	-0.0003	0.0001	-0.0003
40	0.004	0.006	0.001	-0.0003	0.0001	-0.0003
45	0.005	0.009	0.001	-0.0002	0.0000	-0.0004
50	0.005	0.010	0.001	0.0001	-0.0001	-0.0004
55	0.004	0.007	0.001	0.0004	-0.0002	-0.0005
60	0.000	0.000	0.001	0.0008	-0.0004	-0.0005
68	-0.002	-0.004	0.001	0.0010	-0.0005	-0.0006
69	-0.005	-0.013	0.005	0.0026	-0.0010	-0.0004
70	-0.005	-0.019	0.021	0.0039	-0.0013	-0.0003
80	-0.005	-0.019	0.026	0.0040	-0.0013	-0.0003
90	-0.002	-0.018	0.079	0.0041	-0.0016	-0.0002
95	0.000	-0.018	0.116	0.0040	-0.0018	-0.0002
98	0.001	-0.018	0.126	0.0039	-0.0019	-0.0002
99	0.001	-0.018	0.145	0.0029	-0.0017	0.0002
100	-0.000	-0.016	0.158	0.0025	-0.0016	0.0005
110	-0.000	-0.012	0.172	0.0020	-0.0016	0.0005
112	-0.000	-0.005	0.191	0.0012	-0.0013	0.0005
115	-0.000	-0.001	0.204	0.0005	-0.0007	0.0002
120	-0.000	-0.000	0.206	0.0005	-0.0007	0.0002
200	0.004	0.002	-0.001	-0.0003	0.0001	-0.0003
210	0.004	0.002	-0.001	-0.0003	0.0001	-0.0003
250	0.005	0.004	-0.001	-0.0003	0.0001	-0.0003
260	0.005	0.004	-0.001	-0.0003	0.0001	-0.0003

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements
 CASE 1 (OCC) 6.2500 Hz 1.15 Ø

HARMONIC DISPLACEMENTS

Displacement (mm): 0,2845 / Direction: Z

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
15	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
18	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
19	0.001	-0.000	0.001	0.0000	0.0001	-0.0003
20	0.002	0.001	0.001	-0.0004	0.0002	-0.0003
30	0.002	0.001	0.001	-0.0004	0.0002	-0.0003
33	0.004	0.003	0.001	-0.0004	0.0002	-0.0004
35	0.005	0.005	0.001	-0.0004	0.0002	-0.0004
40	0.006	0.009	0.001	-0.0004	0.0001	-0.0005
45	0.007	0.012	0.001	-0.0002	0.0001	-0.0005
50	0.007	0.013	0.001	0.0001	-0.0001	-0.0006
55	0.005	0.010	0.001	0.0005	-0.0003	-0.0007
60	0.000	0.000	0.001	0.0011	-0.0005	-0.0007
68	-0.003	-0.006	0.001	0.0014	-0.0006	-0.0008
69	-0.006	-0.017	0.007	0.0035	-0.0014	-0.0006
70	-0.008	-0.026	0.029	0.0054	-0.0017	-0.0004
80	-0.007	-0.026	0.036	0.0055	-0.0018	-0.0004
90	-0.002	-0.026	0.109	0.0057	-0.0022	-0.0003
95	0.000	-0.026	0.160	0.0055	-0.0025	-0.0002
98	0.001	-0.026	0.174	0.0054	-0.0026	-0.0002
99	0.001	-0.025	0.201	0.0040	-0.0024	0.0003
100	-0.000	-0.023	0.219	0.0034	-0.0022	0.0007
110	-0.000	-0.017	0.238	0.0027	-0.0022	0.0007
112	-0.000	-0.008	0.264	0.0017	-0.0018	0.0006
115	-0.000	-0.001	0.282	0.0007	-0.0009	0.0003
120	-0.000	-0.000	0.284	0.0007	-0.0009	0.0003
200	0.005	0.003	-0.001	-0.0004	0.0002	-0.0004
210	0.006	0.003	-0.001	-0.0004	0.0002	-0.0004
250	0.006	0.005	-0.001	-0.0004	0.0002	-0.0004
260	0.007	0.005	-0.001	-0.0004	0.0002	-0.0004

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 1 (OCC) 6.2500 Hz 1.15 Ø

HARMONIC DISPLACEMENTS

Displacement (mm): 0,3699 / Direction: Z

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
15	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
18	0.000	0.000	0.000	0.0001	0.0000	-0.0000
19	0.001	-0.000	0.001	0.0000	0.0001	-0.0003
20	0.003	0.001	0.001	-0.0005	0.0003	-0.0004
30	0.003	0.001	0.001	-0.0005	0.0003	-0.0004
33	0.005	0.004	0.001	-0.0005	0.0003	-0.0005
35	0.006	0.007	0.001	-0.0005	0.0002	-0.0005
40	0.008	0.012	0.001	-0.0005	0.0002	-0.0006
45	0.009	0.016	0.001	-0.0003	0.0001	-0.0007
50	0.009	0.017	0.001	0.0001	-0.0001	-0.0008
55	0.006	0.013	0.001	0.0007	-0.0004	-0.0009
60	0.000	0.000	0.002	0.0014	-0.0007	-0.0010
68	-0.004	-0.008	0.002	0.0018	-0.0008	-0.0010
69	-0.008	-0.023	0.009	0.0046	-0.0019	-0.0007
70	-0.010	-0.033	0.037	0.0071	-0.0023	-0.0005
80	-0.009	-0.033	0.047	0.0071	-0.0023	-0.0005
90	-0.003	-0.033	0.142	0.0074	-0.0029	-0.0004
95	0.000	-0.033	0.209	0.0071	-0.0033	-0.0003
98	0.001	-0.033	0.226	0.0070	-0.0034	-0.0003
99	0.001	-0.033	0.261	0.0052	-0.0031	0.0004
100	-0.000	-0.030	0.285	0.0044	-0.0029	0.0009
110	-0.000	-0.022	0.309	0.0036	-0.0029	0.0010
112	-0.000	-0.010	0.343	0.0022	-0.0023	0.0008
115	-0.000	-0.001	0.367	0.0009	-0.0012	0.0004
120	-0.000	-0.000	0.370	0.0008	-0.0012	0.0004
200	0.007	0.004	-0.001	-0.0005	0.0003	-0.0005
210	0.007	0.004	-0.002	-0.0005	0.0003	-0.0005
250	0.008	0.007	-0.001	-0.0005	0.0002	-0.0005
260	0.009	0.007	-0.002	-0.0005	0.0002	-0.0005

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38
 Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL
 Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements
 CASE 1 (OCC) 6.2500 Hz 1.15 Ø

HARMONIC DISPLACEMENTS

Displacement (mm): 0,4632 / Direction: Z

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
15	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
18	0.000	0.000	0.000	0.0001	0.0000	-0.0000
19	0.001	-0.000	0.001	0.0000	0.0002	-0.0004
20	0.004	0.001	0.001	-0.0006	0.0003	-0.0005
30	0.004	0.001	0.001	-0.0006	0.0003	-0.0005
33	0.006	0.006	0.001	-0.0006	0.0003	-0.0006
35	0.007	0.009	0.001	-0.0007	0.0003	-0.0006
40	0.010	0.014	0.001	-0.0006	0.0002	-0.0007
45	0.012	0.020	0.002	-0.0004	0.0001	-0.0008
50	0.012	0.022	0.002	0.0001	-0.0001	-0.0010
55	0.008	0.016	0.002	0.0008	-0.0005	-0.0011
60	0.000	0.000	0.002	0.0018	-0.0009	-0.0012
68	-0.005	-0.010	0.002	0.0022	-0.0010	-0.0012
69	-0.011	-0.028	0.011	0.0058	-0.0023	-0.0009
70	-0.012	-0.042	0.046	0.0088	-0.0028	-0.0006
80	-0.011	-0.042	0.059	0.0089	-0.0029	-0.0006
90	-0.004	-0.042	0.178	0.0092	-0.0036	-0.0005
95	0.000	-0.042	0.261	0.0089	-0.0041	-0.0004
98	0.001	-0.042	0.283	0.0088	-0.0043	-0.0004
99	0.001	-0.041	0.327	0.0065	-0.0039	0.0005
100	-0.000	-0.037	0.356	0.0055	-0.0036	0.0011
110	-0.000	-0.027	0.387	0.0045	-0.0036	0.0012
112	-0.000	-0.012	0.430	0.0028	-0.0029	0.0010
115	-0.000	-0.001	0.460	0.0011	-0.0015	0.0006
120	-0.000	-0.000	0.463	0.0011	-0.0015	0.0005
200	0.009	0.006	-0.002	-0.0007	0.0003	-0.0006
210	0.009	0.006	-0.002	-0.0007	0.0003	-0.0006
250	0.010	0.009	-0.002	-0.0007	0.0003	-0.0007
260	0.011	0.009	-0.002	-0.0007	0.0003	-0.0007

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 1 (OCC) 6.2500 Hz 1.15 Ø

HARMONIC DISPLACEMENTS

Displacement (mm): 0,5661 / Direction: Z

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
15	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
18	0.000	0.000	0.001	0.0001	0.0000	-0.0001
19	0.002	-0.000	0.002	0.0000	0.0002	-0.0005
20	0.004	0.001	0.001	-0.0007	0.0004	-0.0007
30	0.004	0.001	0.001	-0.0007	0.0004	-0.0007
33	0.007	0.007	0.001	-0.0008	0.0004	-0.0007
35	0.009	0.010	0.002	-0.0008	0.0004	-0.0008
40	0.012	0.018	0.002	-0.0007	0.0003	-0.0009
45	0.015	0.024	0.002	-0.0004	0.0001	-0.0010
50	0.014	0.027	0.002	0.0002	-0.0002	-0.0012
55	0.010	0.020	0.002	0.0010	-0.0006	-0.0013
60	0.000	0.000	0.003	0.0022	-0.0010	-0.0015
68	-0.006	-0.012	0.003	0.0027	-0.0013	-0.0015
69	-0.013	-0.034	0.014	0.0071	-0.0028	-0.0011
70	-0.015	-0.051	0.057	0.0108	-0.0034	-0.0007
80	-0.014	-0.051	0.072	0.0109	-0.0035	-0.0007
90	-0.005	-0.051	0.217	0.0113	-0.0044	-0.0006
95	0.001	-0.051	0.319	0.0109	-0.0051	-0.0005
98	0.002	-0.051	0.346	0.0107	-0.0052	-0.0004
99	0.002	-0.050	0.400	0.0079	-0.0048	0.0006
100	-0.000	-0.045	0.436	0.0068	-0.0045	0.0014
110	-0.000	-0.033	0.473	0.0055	-0.0044	0.0015
112	-0.000	-0.015	0.526	0.0034	-0.0035	0.0013
115	-0.000	-0.002	0.562	0.0013	-0.0018	0.0007
120	-0.000	-0.000	0.566	0.0013	-0.0018	0.0007
200	0.010	0.007	-0.002	-0.0008	0.0004	-0.0007
210	0.011	0.007	-0.003	-0.0008	0.0004	-0.0007
250	0.012	0.010	-0.002	-0.0008	0.0004	-0.0008
260	0.013	0.010	-0.003	-0.0008	0.0004	-0.0008

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 1 (OCC) 6.2500 Hz 1.15 Ø

HARMONIC DISPLACEMENTS

Displacement (mm): 0,6807 / Direction: Z

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
15	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
18	0.000	0.000	0.001	0.0001	0.0000	-0.0001
19	0.002	-0.000	0.002	0.0000	0.0002	-0.0006
20	0.005	0.002	0.002	-0.0008	0.0005	-0.0008
30	0.005	0.002	0.002	-0.0009	0.0005	-0.0008
33	0.009	0.008	0.002	-0.0010	0.0005	-0.0009
35	0.011	0.012	0.002	-0.0010	0.0004	-0.0010
40	0.015	0.021	0.002	-0.0009	0.0003	-0.0011
45	0.017	0.029	0.002	-0.0005	0.0001	-0.0012
50	0.017	0.032	0.002	0.0002	-0.0002	-0.0014
55	0.012	0.023	0.003	0.0012	-0.0007	-0.0016
60	0.000	0.000	0.003	0.0026	-0.0013	-0.0018
68	-0.007	-0.015	0.003	0.0032	-0.0015	-0.0018
69	-0.015	-0.041	0.016	0.0085	-0.0034	-0.0013
70	-0.018	-0.061	0.068	0.0130	-0.0041	-0.0009
80	-0.017	-0.061	0.086	0.0131	-0.0043	-0.0009
90	-0.006	-0.061	0.261	0.0136	-0.0053	-0.0008
95	0.001	-0.061	0.384	0.0131	-0.0061	-0.0006
98	0.002	-0.061	0.416	0.0129	-0.0063	-0.0005
99	0.002	-0.060	0.481	0.0095	-0.0057	0.0007
100	-0.000	-0.054	0.524	0.0081	-0.0054	0.0017
110	-0.000	-0.040	0.568	0.0066	-0.0053	0.0018
112	-0.000	-0.018	0.632	0.0041	-0.0042	0.0015
115	-0.000	-0.002	0.675	0.0016	-0.0022	0.0008
120	-0.000	-0.000	0.680	0.0016	-0.0022	0.0008
200	0.013	0.008	-0.002	-0.0010	0.0005	-0.0009
210	0.014	0.008	-0.003	-0.0010	0.0005	-0.0009
250	0.015	0.012	-0.002	-0.0010	0.0004	-0.0010
260	0.016	0.012	-0.003	-0.0010	0.0004	-0.0010

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: DEC 15, 2022 Time: 20:38

Job:: SUCTION 2ND STAGE - R7.C2 - FINAL

Licensed To:: Licensed To:: PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

DISPLACEMENTS REPORT: Nodal Movements

CASE 1 (OCC) 6.2500 Hz 1.15 Ø

HARMONIC DISPLACEMENTS

Displacement (mm): 0,8100 / Direction: Z

Node	DX mm.	DY mm.	DZ mm.	RX deg.	RY deg.	RZ deg.
10	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
15	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
18	0.000	0.000	0.001	0.0001	0.0000	-0.0001
19	0.003	-0.000	0.002	0.0000	0.0003	-0.0007
20	0.006	0.002	0.002	-0.0010	0.0006	-0.0009
30	0.006	0.002	0.002	-0.0010	0.0006	-0.0009
33	0.010	0.010	0.002	-0.0011	0.0006	-0.0011
35	0.013	0.015	0.002	-0.0011	0.0005	-0.0011
40	0.017	0.025	0.002	-0.0010	0.0004	-0.0013
45	0.021	0.035	0.003	-0.0006	0.0002	-0.0015
50	0.021	0.038	0.003	0.0003	-0.0003	-0.0017
55	0.014	0.028	0.003	0.0015	-0.0008	-0.0019
60	0.000	0.000	0.004	0.0031	-0.0015	-0.0021
68	-0.008	-0.017	0.004	0.0038	-0.0018	-0.0022
69	-0.018	-0.049	0.019	0.0101	-0.0041	-0.0016
70	-0.021	-0.073	0.081	0.0154	-0.0049	-0.0010
80	-0.020	-0.073	0.103	0.0156	-0.0051	-0.0010
90	-0.007	-0.073	0.311	0.0161	-0.0064	-0.0009
95	0.001	-0.073	0.457	0.0156	-0.0073	-0.0007
98	0.002	-0.073	0.495	0.0153	-0.0075	-0.0006
99	0.002	-0.072	0.572	0.0114	-0.0068	0.0008
100	-0.000	-0.065	0.623	0.0097	-0.0064	0.0020
110	-0.000	-0.048	0.676	0.0078	-0.0063	0.0021
112	-0.000	-0.021	0.752	0.0048	-0.0050	0.0018
115	-0.000	-0.002	0.804	0.0019	-0.0026	0.0010
120	-0.000	-0.000	0.809	0.0019	-0.0026	0.0010
200	0.015	0.010	-0.003	-0.0011	0.0006	-0.0011
210	0.016	0.010	-0.004	-0.0011	0.0006	-0.0011
250	0.018	0.015	-0.003	-0.0012	0.0005	-0.0011
260	0.019	0.015	-0.004	-0.0012	0.0005	-0.0011

RESUMO DAS VELOCIDADES OBTIDAS NA ANÁLISE HARMÔNICA VIA CAESAR II®

DESLOCAMENTOS PARA CURVAS DE EXCITAÇÃO [EIXO "Z"]

EXCITAÇÃO #1					EXCITAÇÃO #2					EXCITAÇÃO #3				
TEMPO	D _{bocal(0-pico)}	deltaD	D _{curva(0-pico)}	V _{curva-rms}	TEMPO	D _{bocal(0-pico)}	deltaD	D _{curva(0-pico)}	V _{curva-rms}	TEMPO	D _{bocal(0-pico)}	deltaD	D _{curva(0-pico)}	V _{curva-rms}
[mês]	[mm]		[mm]	[mm/s]	[mês]	[mm]		[mm]	[mm/s]	[mês]	[mm]		[mm]	[mm/s]
0	0,1500	0	0,115	15,327	0	0,1500	0	0,115	15,327	0	0,1500	0	0,115	15,327
0,25	0,1502	0,0002			0,25	0,1502	0,0002			0,25	0,1502	0,0002		
0,50	0,1506	0,0004	0,116	15,461	0,50	0,1506	0,0004	0,116	15,461	0,50	0,1506	0,0004	0,116	15,461
0,75	0,1512	0,0006			0,75	0,1512	0,0006			0,75	0,1512	0,0006		
1,00	0,1520	0,0008	0,117	15,594	1,00	0,1520	0,0008	0,117	15,594	1,00	0,1520	0,0008	0,117	15,594
1,25	0,1530	0,0010			1,25	0,1530	0,0010			1,25	0,1530	0,0010		
1,50	0,1542	0,0012	0,119	15,861	1,50	0,1542	0,0012	0,119	15,861	1,50	0,1542	0,0012	0,119	15,861
1,75	0,1556	0,0014			1,75	0,1556	0,0014			1,75	0,1556	0,0014		
2,00	0,1572	0,0016	0,121	16,127	2,00	0,1572	0,0016	0,121	16,127	2,00	0,1572	0,0016	0,121	16,127
2,25	0,1591	0,0019			2,25	0,1591	0,0019			2,25	0,1591	0,0019		
2,50	0,1614	0,0023	0,124	16,527	2,50	0,1614	0,0023	0,124	16,527	2,50	0,1614	0,0023	0,124	16,527
2,75	0,1640	0,0027			2,75	0,1640	0,0027			2,75	0,1640	0,0027		
3,00	0,1671	0,0031	0,129	17,193	3,00	0,1671	0,0031	0,129	17,193	3,00	0,1671	0,0031	0,129	17,193
3,25	0,1705	0,0035			3,25	0,1705	0,0035			3,25	0,1705	0,0035		
3,50	0,1744	0,0039	0,134	17,860	3,50	0,1744	0,0039	0,134	17,860	3,50	0,1744	0,0039	0,134	17,860
3,75	0,1786	0,0043			3,75	0,1786	0,0043			3,75	0,1786	0,0043		
4,00	0,1833	0,0047	0,141	18,793	4,00	0,1833	0,0047	0,141	18,793	4,00	0,1833	0,0047	0,141	18,793
4,25	0,1883	0,0051			4,25	0,1883	0,0051			4,25	0,1883	0,0051		
4,50	0,1938	0,0055	0,149	19,859	4,50	0,1938	0,0055	0,149	19,859	4,50	0,1938	0,0055	0,149	19,859
4,75	0,1996	0,0059			4,75	0,1996	0,0059			4,75	0,1996	0,0059		
5,00	0,2059	0,0063	0,158	21,059	5,00	0,2059	0,0063	0,158	21,059	5,00	0,2059	0,0063	0,158	21,059
5,25	0,2134	0,0076			5,25	0,2134	0,0076			5,25	0,2134	0,0076		
5,50	0,2211	0,0077	0,170	22,658	5,50	0,2211	0,0077	0,170	22,658	5,50	0,2211	0,0077	0,170	22,658
5,75	0,2288	0,0077			5,75	0,2288	0,0077			5,75	0,2288	0,0077		
6,00	0,2366	0,0078	0,182	24,257	6,00	0,2366	0,0078	0,182	24,257	6,00	0,2366	0,0078	0,182	24,257
6,25	0,2444	0,0078			6,25	0,2444	0,0078			6,25	0,2444	0,0078		
6,50	0,2523	0,0079	0,194	25,857	6,50	0,2523	0,0079	0,194	25,857	6,50	0,2523	0,0079	0,194	25,857
6,75	0,2603	0,0080			6,75	0,2603	0,0080			6,75	0,2603	0,0080		
7,00	0,2683	0,0080	0,206	27,456	7,00	0,2683	0,0080	0,206	27,456	7,00	0,2683	0,0080	0,206	27,456
7,25	0,2764	0,0081			7,25	0,2764	0,0081			7,25	0,2764	0,0081		
7,50	0,2845	0,0082	0,219	29,189	7,50	0,2845	0,0082	0,219	29,189	7,50	0,2845	0,0082	0,219	29,189
7,75	0,2927	0,0082			7,75	0,2927	0,0082			7,75	0,2927	0,0082		
8,00	0,3010	0,0083	0,232	30,922	8,00	0,3010	0,0083	0,232	30,922	8,00	0,3010	0,0083	0,232	30,922
8,25	0,3094	0,0084			8,25	0,3094	0,0084			8,25	0,3094	0,0084		
8,50	0,3178	0,0084	0,245	32,654	8,50	0,3178	0,0084	0,245	32,654	8,50	0,3178	0,0084	0,245	32,654
8,75	0,3263	0,0085			8,75	0,3263	0,0085			8,75	0,3263	0,0085		
9,00	0,3349	0,0086	0,258	34,387	9,00	0,3349	0,0086	0,258	34,387	9,00	0,3349	0,0086	0,258	34,387
9,25	0,3435	0,0086			9,25	0,3435	0,0086			9,25	0,3435	0,0086		
9,50	0,3522	0,0087	0,271	36,120	9,50	0,3522	0,0087	0,271	36,120	9,50	0,3522	0,0087	0,271	36,120
9,75	0,3610	0,0088			9,75	0,3610	0,0088			9,75	0,3610	0,0088		
10,00	0,3699	0,0089	0,285	37,986	10,00	0,3699	0,0089	0,285	37,986	10,00	0,3699	0,0089	0,285	37,986
10,25	0,3789	0,0090			10,25	0,3789	0,0090			10,25	0,3789	0,0090		
10,50	0,3879	0,0090	0,299	39,851	10,50	0,3879	0,0090	0,299	39,851	10,50	0,3879	0,0090	0,299	39,851
10,75	0,3970	0,0091			10,75	0,3970	0,0091			10,75	0,3970	0,0091		
11,00	0,4062	0,0092	0,313	41,717	11,00	0,4062	0,0092	0,313	41,717	11,00	0,4062	0,0092	0,313	41,717
11,25	0,4155	0,0093			11,25	0,4155	0,0093			11,25	0,4155	0,0093		
11,50	0,4248	0,0094	0,327	43,583	11,50	0,4248	0,0094	0,327	43,583	11,50	0,4248	0,0094	0,327	43,583
11,75	0,4343	0,0095			11,75	0,4343	0,0095			11,75	0,4343	0,0095		
12,00	0,4438	0,0095	0,342	45,583	12,00	0,4438	0,0095	0,342	45,583	12,00	0,4438	0,0095	0,342	45,583
12,25	0,4535	0,0096			12,25	0,4535	0,0096			12,25	0,4535	0,0096		
12,50	0,4632	0,0097	0,356	47,449	12,50	0,4632	0,0097	0,356	47,449	12,50	0,4632	0,0097	0,356	47,449
12,75	0,4730	0,0098			12,75	0,4730	0,0098			12,75	0,4730	0,0098		
13,00	0,4830	0,0099	0,372	49,581	13,00	0,4830	0,0099	0,372	49,581	13,00	0,4830	0,0099	0,372	49,581
13,25	0,4930	0,0100			13,25	0,4930	0,0100			13,25	0,4930	0,0100		
13,50	0,5031	0,0101	0,387	51,580	13,50	0,5031	0,0101	0,387	51,580	13,50	0,5031	0,0101	0,387	51,580
13,75	0,5133	0,0102			13,75	0,5133	0,0102			13,75	0,5133	0,0102		
14,00	0,5237	0,0103	0,403	53,713	14,00	0,5237	0,0103	0,403	53,713	14,00	0,5237	0,0103	0,403	53,713
14,25	0,5341	0,0104			14,25	0,5341	0,0104			14,25	0,5341	0,0104		
14,50	0,5446	0,0105	0,419	55,845	14,50	0,5446	0,0105	0,419	55,845	14,50	0,5446	0,0105	0,419	55,845
14,75	0,5553	0,0107			14,75	0,5553	0,0107			14,75	0,5553	0,0107		
15,00	0,5661	0,0108	0,436	58,111	15,00	0,5661	0,0108	0,436	58,111	15,00	0,5661	0,0108	0,436	58,111
15,25	0,5770	0,0109			15,25	0,5770	0,0109			15,25	0,5770	0,0109		
15,50	0,5880	0,0110	0,453	60,377	15,50	0,5880	0,0110	0,453	60,377	15,50	0,5880	0,0110	0,453	60,377
15,75	0,5991	0,0111			15,75	0,5991	0,0111			15,75	0,5991	0,0111		
16,00	0,6104	0,0113	0,470	62,643	16,00	0,6104	0,0113	0,470	62,643	16,00	0,6104	0,0113	0,470	62,643
16,25	0,6218	0,0114			16,25	0,6218	0,0114			16,25	0,6218	0,0114		
16,50	0,6333	0,0115	0,487	64,909	16,50	0,6333	0,0115	0,487	64,909	16,50	0,6333	0,0115	0,487	64,909
16,75	0,6449	0,0116			16,75	0,6449	0,0116			16,75	0,6449	0,0116		
17,00	0,6567	0,0118	0,505	67,308	17,00	0,6567	0,0118	0,505	67,308	17,00	0,6567	0,0118	0,505	67,308
17,25	0,6686	0,0119			17,25	0,6686	0,0119			17,25	0,6686	0,0119		
17,50	0,6807	0,0121	0,524	69,840	17,50	0,6807	0,0121	0,524	69,840	17,50	0,6807	0,0121	0,524	69,840
17,75	0,6929	0,0122			17,75	0,6929	0,0122			17,75	0,6929	0,0122		
18,00	0,7053	0,0124	0,543	72,372	18,00	0,7053	0,0124	0,543	72,372	18,00	0,7053	0,0124	0,543	72,372
18,25	0,7178	0,0125			18,25	0,7178	0,0125			18,25	0,7178	0,0125		
18,50	0,7305	0,0127	0,562	74,905	18,50	0,7305	0,0127	0,562	74,905	18,50	0,7305	0,0127	0,562	74,905
18,75	0,7433	0,0128			18,75	0,7433	0,0128			18,75	0,7433	0,0128		
19,00	0,7563	0,0130	0,582	77,570	19,00	0,7563	0,0130	0,582	77,570	19,00	0,7563	0,0130	0,582	77,570
19,25	0,7695	0,0132			19,25	0,7695	0,0132			19,25	0,7695	0,0132		
19,50	0,7828	0,0133	0,602	80,236	19,50	0,7828	0,0133	0,602	80,236	19,50	0,7828	0,0133	0,602	80,236
19,75	0,7963	0,0135			19,75	0,7963	0,0135			19,75	0,7963	0,0135		
20,00	0,8100	0,0137	0,623	83,035	20,00	0,8100	0,0137	0,623	83,035	20,00	0,8100	0,0137	0,623	83,035
20,25	0,8239	0,0139			20,25	0,8239	0,0139			20,25	0,8239	0,0139		

RESUMO DAS VELOCIDADES OBTIDAS NA ANÁLISE HARMÔNICA VIA CAESAR II®

DESLOCAMENTOS PARA CURVAS DE EXCITAÇÃO [EIXO "Z"]

EXCITAÇÃO #1					EXCITAÇÃO #2					EXCITAÇÃO #3				
TEMPO	D _{bocal(0-pico)}	deltaD	D _{curva(0-pico)}	V _{curva-rms}	TEMPO	D _{bocal(0-pico)}	deltaD	D _{curva(0-pico)}	V _{curva-rms}	TEMPO	D _{bocal(0-pico)}	deltaD	D _{curva(0-pico)}	V _{curva-rms}
[mês]	[mm]		[mm]	[mm/s]	[mês]	[mm]		[mm]	[mm/s]	[mês]	[mm]		[mm]	[mm/s]
20,50	0,8380	0,0141	0,645	85,967	20,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	20,50	0,2885	0,0149	0,222	29,589
20,75	0,8523	0,0143			20,75	0,1822	0,0000			20,75	0,3036	0,0152		
21,00	0,8668	0,0145	0,667	88,899	21,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	21,00	0,3190	0,0154	0,245	32,654
21,25	0,8815	0,0147			21,25	0,1822	0,0000			21,25	0,3347	0,0156		
21,50	0,8965	0,0149	0,690	91,965	21,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	21,50	0,3506	0,0159	0,270	35,986
21,75	0,9116	0,0152			21,75	0,1822	0,0000			21,75	0,3667	0,0161		
22,00	0,9270	0,0154	0,713	95,030	22,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	22,00	0,3831	0,0164	0,295	39,318
22,25	0,9426	0,0156			22,25	0,1822	0,0000			22,25	0,3998	0,0167		
22,50	0,9585	0,0159	0,738	98,363	22,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	22,50	0,4167	0,0170	0,321	42,784
22,75	0,9746	0,0161			22,75	0,1822	0,0000			22,75	0,4340	0,0172		
23,00	0,9910	0,0164	0,763	101,695	23,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	23,00	0,4515	0,0175	0,347	46,249
23,25	1,0077	0,0167			23,25	0,1822	0,0000			23,25	0,4694	0,0179		
23,50	1,0246	0,0169	0,789	105,160	23,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	23,50	0,4875	0,0182	0,375	49,981
23,75	1,0418	0,0172			23,75	0,1822	0,0000			23,75	0,5060	0,0185		
24,00	1,0594	0,0175	0,815	108,625	24,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	24,00	0,5249	0,0189	0,404	53,846
24,25	1,0772	0,0178			24,25	0,1822	0,0000			24,25	0,5441	0,0192		
24,50	1,0954	0,0182	0,843	112,357	24,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	24,50	0,5637	0,0196	0,434	57,845
24,75	1,1138	0,0185			24,75	0,1822	0,0000			24,75	0,5837	0,0200		
25,00	1,1327	0,0188	0,872	116,222	25,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	25,00	0,6041	0,0204	0,465	61,976
25,25	1,1519	0,0192			25,25	0,1822	0,0000			25,25	0,6249	0,0208		
25,50	1,1714	0,0196	0,901	120,088	25,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	25,50	0,6461	0,0212	0,497	66,241
25,75	1,1914	0,0200			25,75	0,1822	0,0000			25,75	0,6678	0,0217		
26,00	1,2117	0,0204	0,932	124,219	26,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	26,00	0,6899	0,0222	0,531	70,773
26,25	1,2325	0,0208			26,25	0,1822	0,0000			26,25	0,7126	0,0227		
26,50	1,2537	0,0212	0,965	128,618	26,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	26,50	0,7358	0,0232	0,566	75,438
26,75	1,2754	0,0217			26,75	0,1822	0,0000			26,75	0,7595	0,0237		
27,00	1,2975	0,0221	0,999	133,149	27,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	27,00	0,7838	0,0243	0,603	80,369
27,25	1,3201	0,0226			27,25	0,1822	0,0000			27,25	0,8087	0,0249		
27,50	1,3433	0,0231	1,034	137,814	27,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	27,50	0,8342	0,0255	0,642	85,567
27,75	1,3670	0,0237			27,75	0,1822	0,0000			27,75	0,8604	0,0262		
28,00	1,3912	0,0243	1,071	142,746	28,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	28,00	0,8873	0,0269	0,683	91,032
28,25	1,4161	0,0249			28,25	0,1822	0,0000			28,25	0,9149	0,0276		
28,50	1,4416	0,0255	1,109	147,810	28,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	28,50	0,9432	0,0284	0,726	96,763
28,75	1,4677	0,0261			28,75	0,1822	0,0000			28,75	0,9724	0,0292		
29,00	1,4945	0,0268	1,150	153,275	29,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	29,00	1,0025	0,0301	0,771	102,761
29,25	1,5221	0,0276			29,25	0,1822	0,0000			29,25	1,0335	0,0310		
29,50	1,5504	0,0283	1,193	159,006	29,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	29,50	1,0654	0,0320	0,820	109,292
29,75	1,5796	0,0291			29,75	0,1822	0,0000			29,75	1,0984	0,0330		
30,00	1,6096	0,0300	1,239	165,137	30,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	30,00	1,1325	0,0341	0,872	116,222
30,25	1,6405	0,0309			30,25	0,1822	0,0000			30,25	1,1678	0,0353		
30,50	1,6724	0,0319	1,287	171,535	30,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	30,50	1,2043	0,0365	0,927	123,553
30,75	1,7053	0,0329			30,75	0,1822	0,0000			30,75	1,2422	0,0379		
31,00	1,7393	0,0340	1,339	178,465	31,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	31,00	1,2816	0,0394	0,986	131,417
31,25	1,7745	0,0352			31,25	0,1822	0,0000			31,25	1,3226	0,0409		
31,50	1,8110	0,0365	1,394	185,796	31,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	31,50	1,3652	0,0427	1,051	140,080
31,75	1,8488	0,0378			31,75	0,1822	0,0000			31,75	1,4097	0,0445		
32,00	1,8881	0,0393	1,453	193,660	32,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	32,00	1,4563	0,0465	1,121	149,410
32,25	1,9289	0,0408			32,25	0,1822	0,0000			32,25	1,5050	0,0488		
32,50	1,9715	0,0426	1,517	202,190	32,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	32,50	1,5562	0,0512	1,198	159,673
32,75	2,0159	0,0444			32,75	0,1822	0,0000			32,75	1,6101	0,0539		
33,00	2,0623	0,0464	1,587	211,519	33,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	33,00	1,6670	0,0569	1,283	171,002
33,25	2,1109	0,0486			33,25	0,1822	0,0000			33,25	1,7272	0,0602		
33,50	2,1620	0,0510	1,664	221,782	33,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	33,50	1,7912	0,0639	1,378	183,663
33,75	2,2157	0,0537			33,75	0,1822	0,0000			33,75	1,8593	0,0682		
34,00	2,2724	0,0567	1,749	233,111	34,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	34,00	1,9323	0,0730	1,487	198,191
34,25	2,3324	0,0600			34,25	0,1822	0,0000			34,25	2,0108	0,0785		
34,50	2,3961	0,0637	1,844	245,773	34,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	34,50	2,0957	0,0849	1,613	214,985
34,75	2,4640	0,0679			34,75	0,1822	0,0000			34,75	2,1881	0,0924		
35,00	2,5366	0,0727	1,952	260,168	35,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	35,00	2,2895	0,1014	1,762	234,844
35,25	2,6148	0,0781			35,25	0,1822	0,0000			35,25	2,4017	0,1122		
35,50	2,6993	0,0845	2,077	276,828	35,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	35,50	2,5272	0,1255	1,945	259,235
35,75	2,7912	0,0919			35,75	0,1822	0,0000			35,75	2,6695	0,1423		
36,00	2,8920	0,1008	2,226	296,687	36,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	36,00	2,8336	0,1641	2,181	290,689
36,25	3,0035	0,1115			36,25	0,1822	0,0000			36,25	3,0269	0,1933		
36,50	3,1281	0,1246	2,407	320,811	36,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	36,50	3,2614	0,2345	2,510	334,539
36,75	3,2692	0,1412			36,75	0,1822	0,0000			36,75	3,5579	0,2965		
37,00	3,4318	0,1626	2,641	351,999	37,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	37,00	3,9568	0,3989	3,045	405,845
37,25	3,6231	0,1913			37,25	0,1822	0,0000			37,25	4,5512	0,5944		
37,50	3,8546	0,2316	2,966	395,316	37,50	0,1822	0,0000	0,140	18,660	37,50	5,6282	1,0770	4,331	577,247
37,75	4,1465	0,2919			37,75	0,1822	0,0000			37,75	8,7902	3,1620		
38,00	4,5374	0,3908	3,492	465,423	38,00	0,1822	0,0000	0,140	18,660	38,00	18,7902	10,0000	14,460	1927,266